

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

ANTENAS MULTIBANDA

**Rubén Pérez Villar
Tutor: Bazil Taha Ahmed**

Julio 2016

ANTENAS MULTIBANDA

AUTOR: Rubén Pérez Villar

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio de 2016



Resumen

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño, simulación, construcción y medición de varios elementos radiantes usando la tecnología microstrip. Estas antenas deben cumplir que trabajen en los dos sistemas de comunicación inalámbrica siguientes: WiFi y WiMAX. Éstas, por tanto, deberán trabajar en las bandas de 2.4 GHz (2.42-2.48 GHz), 5.5 GHz (5.2-5.85 GHz) correspondientes a la tecnología WiFi y 3.5 GHz (3.3-3.8 GHz) correspondiente al WiMAX.

Se parte de un diseño simple de elemento radiante, en nuestro caso, un monopolo que permita cumplir la banda de los 3.5 GHz para, posteriormente, diseñar otro elemento radiante simple, también monopolo, pero esta vez más largo, que permita cumplir la banda de 2.5 GHz. Por temas de espacio, el cual es limitado por las medidas del dieléctrico, se busca que éste esté maximizado, y por ello se decide adoptar una forma distinta a la del primer monopolo.

Comprobado que la simulación es correcta, para ello nos centramos en el coeficiente de reflexión, se procede a añadir una réplica en simulación del conector SMA de 50 Ω . Con ello se pretende realizar una simulación lo más parecida a la realidad posible, para evitar posibles fallos a la hora de medirla con el conector SMA de verdad.

Una vez se ha realizado el primer diseño y comprobado que funciona, se procede a realizar una mejora, que consiste en eliminar las bandas que hayan surgido por encima de 6GHz.

Para ello se procede con el diseño y simulación de un filtro de alta frecuencia, que posteriormente será añadido a la línea de alimentación de la antena. Una vez construido y medido, se comprobará si se cumplen las especificaciones iniciales.

La construcción de las antenas se llevará a cabo en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela Politécnica Superior de la UAM. La medición se realizará en el departamento de RFCAS de la misma, donde con un analizador de redes se procederá a comprobar que se cumplen las condiciones impuestas inicialmente.

Palabras clave

Microstrip, WiFi, WiMAX, coeficiente de reflexión, conector SMA, monopolo, elemento radiante, analizador de redes.

Abstract

The target of this Bachelor Thesis is to design, simulation, make and measure of many radiant elements using microstrip technology. These antennas must work in the following two wireless communication systems: WiFi and WiMAX. These antennas should work in the bands of 2.4 GHz (2.42-2.48 GHz), 5.5 GHz (5.2-5.85 GHz) corresponding to WiFi technology and 3.5 GHz (3.3-3.8 GHz) corresponding to WiMAX.

Starting with a simple radiating element, in this case, a monopole enabling meet the band of 3.5 GHz. Next, we will design another simple radiant element, also monopole, but this time it will be longer, enabling meet the band of 2.5 GHz. Since space is limited because of the size of the dielectric, it is intended that is maximized. Because of this, it is decided adopt another shape different to the first design.

Once the simulation is checked and is corrected, it proceeds to add a mockup of the 50 Ω connector to the simulation. Our intention is to get a simulation as closest as possibly to the reality, so we can avoid any fails once we measure it with the real SMA connector.

As soon as the first design is checked and is working as expected, we are going to make an improvement, deleting all the bands located over 6 GHz.

The first step will be design a high frequency filter, that will be added later to the antenna's feeding line. Once this is manufactured and measured, it will be checked if the antenna meets the specified requirements.

Production of the antennas will be done in the Laboratory of Printed Circuits at Superior Polytechnic School of the UAM. The measurement will be done in the RFCAS department of the mentioned university. Using the network analyzer, it will check if all the design's specified requirements are met.

Keywords

Microstrip, antenna, WiFi, WiMAX, radiant element, dielectric, SMA connector, high frequency filter, network analyzer.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Bazil, el poder haber realizado este TFG que me ha permitido aprender más sobre el funcionamiento de las antenas multibanda y las distintas tecnologías de transmisión de datos inalámbricos. También el hecho de tener que haber resuelto todas mis dudas e inquietudes, las cuales no han sido pocas.

Agradecer a Carlos y Marta el apoyo recibido durante estos últimos meses. Como soy el menor de los tres, tengo que ser el último en graduarme, no podía ser de otra forma. Todas esas tardes juntos que pasamos y pasaremos, no las olvidaré, aunque esté en la otra punta del mundo. Aunque parezca que suena a despedida, no lo es, sólo es el fin de una etapa y el principio de todo lo que nos espera juntos.

No me puedo olvidar de Raquel, quien me ha ayudado todo lo que ha podido, hasta aburrirse de mí. También me ha ayudado a empezar mi vida como ser independiente. La presentación de este trabajo no sería la misma sin ella.

A Damián, amigo desde que mis neuronas me permiten tener recuerdos, que siempre has estado conmigo, aunque me mudara a mesetas de distancia, nunca has dejado de estar ahí. Sé que te hacía mucha ilusión que pusiera el resumen en francés, por ello voy a poner una pequeña parte aquí.

“Pour sujets d’espace, lequel c’est limite pour les mesures du diélectrique, on cherche qu’il soit maximisé, et pour cela que on décide adopter une forme différente au du première monopôle”

Al resto de mis amigos esparcidos por el mundo, Ester, Jacobo... Vuestro apoyo también cuenta, y por ello no me olvido de vosotros.

Y, por último, pero no menos importante, a mis padres y familia, que siempre me han apoyado en todo, han estado ahí, brindándome apoyo y los mejores momentos. Sin vosotros este TFG no hubiera sido posible de ninguna de las maneras.

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Teoría de antenas	3
2.1	Definición de antena.....	3
2.2	Parámetros básicos de una antena.....	3
2.2.1	Impedancia de entrada.....	3
2.2.2	Parámetros S.....	3
2.2.3	Relación de onda estacionaria (SWR).....	5
2.2.4	Adaptación.....	5
2.2.5	Diagrama de radiación.....	6
2.2.6	Ancho de banda.....	7
2.3	Tipos de antenas.....	8
2.3.1	Antenas de elementos.....	8
2.3.2	Antenas de onda progresiva.....	8
2.3.3	Antenas de array.....	8
2.3.4	Antenas de apertura.....	8
2.4	Teoría microstrip.....	8
2.4.4	Definición y características.....	8
2.4.5	Alimentación microstrip.....	9
2.5	Tecnologías WiFi y WiMAX.....	10
2.5.4	WiFi.....	10
2.5.1	WiMAX.....	10
3	Antena multibanda Wifi y WiMAX.....	11
3.1	Introducción.....	11
3.2	Criterios de diseño.....	11
3.2.1	Frecuencias de funcionamiento y ancho de banda.....	11
3.2.2	Sustrato utilizado.....	11
3.2.3	Simulación con conector.....	11
3.3	Diseño de la antena WiFi y WiMAX sin filtro.....	12
3.3.1	Monopolo 3.5 GHz.....	12
3.3.2	Monopolo de 2.5 GHz.....	16
3.3.3	Unión de los dos monopolos.....	20
3.3.4	Conexión del conector SMA.....	23
3.4	Diseño de la antena WiFi y WiMAX con filtro.....	26
3.4.1	Diseño del filtro de altas frecuencias.....	26
3.4.2	Unión de la antena con el filtro.....	30
3.4.3	Conexión del conector SMA.....	36
4	Construcción y medición.....	41
4.1.1	Antena WiFi y WiMAX sin filtro.....	41
4.1.2	Antena WiFi y WiMAX con filtro.....	42
5	Conclusiones y trabajo futuro.....	45
5.1	Conclusiones.....	45
5.2	Trabajo futuro.....	46
	Referencias.....	47
	Glosario.....	49

Anexos.....	I
A Antena Fractal WiFi	I
B Diagramas de radiacion Antena WiFi y WiMAX;	Error! Marcador no definido.
C Diagramas de radiacion Antena WiFi y WiMAX con filtro	VI

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de radiación en 3D	6
Figura 2.2: Diagrama de radiación en 2D	7
Figura 2.3: Estructura de la línea microstrip	9
Figura 3.0: Conector SMA 50 Ω real y simulación	12
Figura 3.1: Esquema monopolo 3.5 GHz	13
Figura 3.2: Simulación del parámetro Gap.....	13
Figura 3.3: Simulación del parámetro L_a	14
Figura 3.4: Simulación del parámetro W_{t1}	14
Figura 3.5: Simulación del parámetro L_1	14
Figura 3.6: Simulación del parámetro W_{t2}	15
Figura 3.7: Coeficiente de reflexión para monopolo de 3.5 GHz	16
Figura 3.8: Esquema monopolo 2.5 GHz	17
Figura 3.9: Simulación del parámetro L_b	17
Figura 3.10: Simulación del parámetro L_2	18
Figura 3.11: Simulación del parámetro L_3	18
Figura 3.12: Simulación del parámetro W_{t3}	18
Figura 3.13: Simulación del parámetro L_4	19
Figura 3.14: Simulación del parámetro W_{t4}	19
Figura 3.15: Coeficiente de reflexión para monopolo de 2.5 GHz.....	20
Figura 3.16: Esquema de antena final	21
Figura 3.17: Coeficiente de reflexión tras la unión de los dos monopolos	21
Figura 3.18: Simulación del parámetro L_1	22
Figura 3.19: Coeficiente de reflexión de la antena propuesta	22
Figura 3.20: Diseño de la antena en CST con el conector SMA en la línea de alimentación de la antena	23
Figura 3.21: Coeficiente de reflexión una vez añadido el conector SMA.....	23
Figura 3.22: Simulación del parámetro L_2	24
Figura 3.23: Simulación del parámetro L_4	24
Figura 3.24: Coeficiente de reflexión para el diseño final de la antena WiFi y WiMAX. .	25
Figura 3.25: Esquema del filtro de alta frecuencia a diseñar	26
Figura 3.26: Simulación del parámetro W_{t5}	27
Figura 3.27: Simulación del parámetro W_{t5} acotado entre 0.1 y 0.5 mm	27
Figura 3.28: Simulación del parámetro L_5 y L_6 (puesto que son simétricos solo se simula uno de ellos para no duplicar la gráfica)	28
Figura 3.29: Simulación del parámetro L_5 y L_6 entre 7.5 y 8.5 mm	28
Figura 3.30: Simulación del parámetro A_1	28
Figura 3.31: Coeficiente de transmisión para el filtro de altas frecuencias diseñado	29
Figura 3.32: Coeficiente de reflexión para el filtro de altas frecuencias diseñado	30
Figura 3.33: Geometría final del filtro diseñado	30
Figura 3.34: Esquema de la antena con el filtro de altas frecuencias incorporado en la pista de alimentación de la antena	31
Figura 3.35: Coeficiente de reflexión de la antena con el filtro	31
Figura 3.36: Simulación del parámetro L_5	32
Figura 3.37: Simulación del parámetro L_5 entre 4.75 y 6 mm	32
Figura 3.38: Simulación del parámetro L_2	32
Figura 3.39: Simulación del parámetro L_4	33
Figura 3.40: Simulación del parámetro L_1	33

Figura 3.41: Simulación del parámetro W_1	33
Figura 3.42: Simulación del parámetro L_5 esta vez entre valores más pequeños	34
Figura 3.43: Coeficiente de reflexión para el diseño de la antena con filtro de altas frecuencias	35
Figura 3.44: Vista en CST de la antena con el filtro de altas frecuencias y el conector SMA	36
Figura 3.45: Coeficiente de reflexión para la antena con el filtro de altas frecuencias y el conector SMA	36
Figura 3.46: Simulación del parámetro L_5	37
Figura 3.47: Simulación del parámetro L_1	37
Figura 3.48: Simulación del parámetro L_2	37
Figura 3.49: Simulación del parámetro L_4	38
Figura 3.50: Simulación del parámetro W_a	38
Figura 3.51: Coeficiente de reflexión del diseño final con conector SMA de la antena.....	39
Figura 4.1: Parte frontal y trasera de la antena construida	41
Figura 4.2: Coeficiente de reflexión obtenido con el analizador de redes para el primer diseño. Se muestra de 1 a 8.5 GHz	42
Figura 4.3: Parte frontal y trasera de la antena construida	43
Figura 4.4: Coeficiente de reflexión para el segundo diseño de la antena. El rango de medición abarca de 1 a 10 GHz.....	43
Figura 4.5: Coeficiente de reflexión para el segundo diseño. En este caso el rango de medición abarca desde 1 a 7.5 GHz	44
Figura A.1: Esquema de la antena propuesta	I
Figura A.2: Simulación del parámetro L_2	II
Figura A.3: Simulación del parámetro L_3	II
Figura A.4: Simulación del parámetro L_5	II
Figura A.5: Simulación del parámetro Θ_1	III
Figura A.6: Simulación del parámetro S	III
Figura A.7: Simulación del parámetro S acotada	III
Figura A.8: Coeficiente de reflexión de la antena	IV
Figura B.1: Campo eléctrico para $f=2.452$ GHz.....	V
Figura B.2: Campo magnético para $f=2.452$ GHz.....	V
Figura B.3: Campo eléctrico para $f=3.541$ GHz.....	V
Figura B.4: Campo magnético para $f=3.541$ GHz.....	V
Figura B.5: Campo eléctrico para $f=5.675$ GHz.....	V
Figura B.6: Campo magnético para $f=5.675$ GHz.....	V
Figura C.1: Campo eléctrico para $f=2.507$ GHz	VI
Figura C.2: Campo magnético para $f=2.507$ GHz.....	VI
Figura C.3: Campo eléctrico para $f=3.475$ GHz.....	VI
Figura C.4: Campo magnético para $f=3.475$ GHz.....	VI
Figura C.5: Campo eléctrico para $f=5.411$ GHz.....	VI
Figura C.6: Campo magnético para $f=5.411$ GHz.....	VI

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Descripción de parámetros S	4
Tabla 3.1: Medidas monopolo de 3.5 GHz.....	15
Tabla 3.2: Medidas monopolo de 2.5 GHz.....	20
Tabla 3.3: Medidas antena una vez se han unido los dos monopolos	22
Tabla 3.4: Medidas finales de la antena con conector SMA	25
Tabla 3.5: Medidas del filtro de altas frecuencias	29
Tabla 3.6: Medidas de la antena con el filtro de altas frecuencias	35
Tabla 3.7: Medidas antena con filtro de altas frecuencias y conector SMA. Son las medidas finales de este diseño	39
Tabla A.1: Valores óptimos de los parámetros de diseño	IV

1 Introducción

Este trabajo presenta el proyecto técnico de ingeniería que consiste en el diseño, construcción, medida y análisis de distintos elementos radiantes que trabajan en el sistema WiFi y WiMAX.

1.1 Motivación

La comunicación es uno de los factores más importantes para unir a las personas y mantenernos conectados unos con otros. Por ello, tanto los dispositivos como la tecnología que permiten la comunicación entre las personas están evolucionando constantemente y mejorando sus prestaciones para satisfacer esa nueva demanda de la sociedad del siempre conectado.

Esto ha propiciado el desarrollo de distintas tecnologías para que los usuarios puedan tener acceso tanto a redes de área local como personales a la vez que se les permite disfrutar de cierta movilidad. Tanto la conectividad WiFi, como el WiMAX (menos expandido, pero que tiene sus ventajas) permiten recibir información en cualquier lugar, por ello, es importante poder desarrollar una antena que permita poder trabajar con ambas tecnologías, permitiendo mantener la portabilidad y tamaño reducido de muchos dispositivos. Además, la estandarización de estas tecnologías permite la interconexión de la mayoría de dispositivos para el intercambio de información.

Las antenas multibandas, además, permiten una mejor optimización de espectro, puesto que pueden emitir o recibir información en bandas que no tienen por qué estar juntas necesariamente. Esto es posible gracias al uso de determinados filtros en conjunto con las antenas.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo de fin de grado es diseñar dos antenas multibanda de parche que operen en las dos bandas de WiFi (2,5 y 5 GHz) y WiMAX (3,5 GHz). Para ello, partiremos de un primer diseño, que trabaja en varias frecuencias, entre ellas las mencionadas anteriormente. A partir de ahí, se le añadirá estructuras de filtrados de alta frecuencia en la propia antena para eliminar las bandas que no necesitemos y centrarnos en las propuestas.

Los objetivos concretos se detallan a continuación:

- Diseño de una antena multibanda de parche que permita trabajar en las frecuencias europeas de WiFi y WiMAX mediante un software comercial.
- Incorporación de un filtro que rechace las altas frecuencias para centrarnos en las bandas solicitadas.
- Construcción en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de los prototipos diseñados anteriormente.
- Medidas de las características radioeléctricas de la antena, para ello se utilizará el Analizador de Redes, propiedad del RFCAS.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- En el capítulo 2 se hace referencia a los fundamentos teóricos de antenas, en el, además, se detallan los parámetros utilizados en este trabajo de fin de grado.
- En el capítulo 3 se presenta el trabajo principal del presente proyecto. En él se incluye el diseño de las distintas antenas, desde el diseño básico, hasta el mejorado con el filtro de altas frecuencias para no interferir en otros sistemas inalámbricos que utilicen esas bandas de frecuencias.
- En el capítulo 4 se muestran los resultados de la medición de las distintas antenas construidas, y se compara estas medidas con las simulaciones realizadas en el capítulo anterior.
- En el capítulo 5 se detallan las conclusiones obtenidas a lo largo de la realización de este trabajo, así como las posibles mejoras y líneas de trabajo futuro.

2 Teoría de antenas

2.1 Definición de antena

El (IEEE Std. 145-1983) [1] (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) define una antena como la parte de un sistema transmisor o receptor diseñada para que cumpla la misión de radiar o recibir ondas magnéticas.

La principal función de la antena es radiar la potencia que se le suministra cumpliendo una serie de características de direccionalidad adecuadas a la aplicación. Según como haya sido diseñada la antena, y cual sea su propósito, esta podrá radiar en todas las direcciones (antena omnidireccional), o en una dirección específica (antena directiva).

Un buen rendimiento, una buena adaptación a la línea de transmisión a la que se conecta, un buen rendimiento y un buen diagrama de radiación caracterizaran a una antena bien diseñada.

2.2 Parámetros básicos de una antena

2.2.1 Impedancia de entrada

Se puede definir la impedancia de entrada de una antena como la relación que existe entre la tensión y la corriente en los terminales de entrada de la misma. Está formada por una parte real, $R_A(w)$, llamada resistencia, y una parte imaginaria, $X_A(w)$ denominada reactancia, siendo ambas dependientes de la frecuencia.

$R_A(w)$, o la parte real, se puede descomponer como $R_A(w)=R_r+R_L$, siendo R_r la resistencia de radiación y R_L la resistencia de pérdidas óhmicas. Todo esto es posible porque se produce una pérdida neta de potencia hacia el espacio libre provocada por la radiación, y estas son mayores que las pérdidas que pueden producirse en la antena.

2.2.2 Parámetros S

Los circuitos de microondas se pueden caracterizar de distintas formas: a través de las matrices de impedancia Z , muy útiles en circuitos en serie, o mediante matrices de admitancia Y , útiles para analizar circuitos en paralelo. Pero el problema surge en altas frecuencias, donde se presentan problemas a la hora de relacionar magnitudes de tensión y corriente como hacen las matrices Z e Y considerando circuitos abiertos o cortocircuitos.

Los parámetros S llegaron para solucionar ese problema puesto que estos se basan en los niveles de potencia percibidos en los terminales de ambos puertos y validos tanto en alta como en baja frecuencia.

De la siguiente manera se pueden relacionar las ondas de potencia incidente y reflejada con la matriz de parámetros S .

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Desarrollando las ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Cargando cada terminal que conforma la red con su impedancia característica respectiva excepto el terminal i -esimo, se calcula el parámetro s_{ji} , conectando al terminal sin carga un generador que produzca la onda incidente, a la que denominaremos a_i , siendo nulas el resto de ondas incidentes. Por lo que operando y despejando obtenemos la siguiente formula.

$$s_{ji} = \left(\frac{b_j}{a_i} \right)_{a_k=0, \forall k \neq i} \quad (2.4)$$

La tabla 2.1 muestra el significado de cada uno de los parámetros S de una red compuesta por dos puertos.

Parámetro S	Nombre	Fórmula	Descripción
S_{11}	Reflexión a la entrada	$s_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big _{a_2=0}$	Potencia que se refleja en el puerto 1 al generar una onda en dicho puerto.
S_{12}	Transmisión o ganancia inversa	$s_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big _{a_1=0}$	Potencia que llega al puerto 1 cuando se alimenta la red por el puerto 2
S_{21}	Transmisión o ganancia directa	$s_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big _{a_2=0}$	Potencia que llega al puerto 2 cuando se alimenta la red por el puerto 1
S_{22}	Reflexión a la salida	$s_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big _{a_1=0}$	Potencia que se refleja en el puerto 2 al generar una onda en dicho puerto.

Tabla 2.1: Descripción de parámetros S

2.2.3 Relación de onda estacionaria (SWR)

La Relación de Onda Estacionaria (ROE) o Standing Wave Ratio (SWR) por sus siglas en inglés, se define como el cociente entre los valores de tensión máximo y mínimo de la onda estacionaria.

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |s_{11}|}{1 - |s_{11}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.5)$$

La ROE es siempre un número real positivo comprendido entre $1 \leq ROE \leq \infty$. Cuando se consigue que la antena este perfectamente adaptada, el valor de ROE será igual a 1 ($s_{11} = 0$).

2.2.4 Adaptación

Los generadores de señales se conectan a las antenas mediante líneas de transmisión. Estas líneas de transmisión poseen una impedancia característica Z_0 , que puede ser igual, o distinta, a la impedancia de que tiene la antena. La trasferencia de potencia desde el generador a la antena se mide mediante el coeficiente de reflexión Γ que se define como:

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (2.6)$$

Siendo Z_a la impedancia de entrada de la antena y Z_0 la impedancia característica de la línea de transmisión.

Dado el caso de que las dos impedancias sean iguales, entonces no se producirá reflexión. Si son distintas, una parte de la potencia se reflejará provocando que la antena sea menos eficiente que en el caso anterior.

También debe haber adaptación entre el generador encargado de proporcionar la señal a la antena y la línea de transmisión de la antena. Es necesario que en la potencia disponible en el generador haya una relación de adaptación entre su impedancia y la que se ve desde el mismo. Desde el punto de vista del generador, tenemos una impedancia $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$, pudiendo definir la potencia que entra en la red como:

$$P_{in} = \frac{1}{2} |I|^2 R_{in} = \frac{1}{2} \left| \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \right|^2 R_{in} \quad (2.7)$$

2.2.5 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación se encarga de la representación gráfica en distintas direcciones del espacio de las propiedades de radiación de la antena. Este diagrama puede ser en dos o tres dimensiones, representando la densidad de potencia que la antena recibe o emite hacia el medio.

El diagrama de radiación se define en condiciones de campo lejano. Esto se da cuando la distribución angular del campo no depende de la distancia con respecto de la antena, comportándose la onda a esa distancia como una onda plana para cada dirección del espacio. La distancia mínima para la cual se puede definir las condiciones de campo lejano se corresponde con $2D^2/\lambda$, siendo λ la longitud de onda de funcionamiento de la antena y D la dimensión máxima de la misma.

La representación en tres dimensiones del diagrama de radiación se realiza mediante el sistema de coordenadas esféricas, definido por las siguientes tres magnitudes: radio r (distancia al origen), ángulo polar Θ (respecto al eje z) y el azimut ϕ (ángulo respecto al eje x).

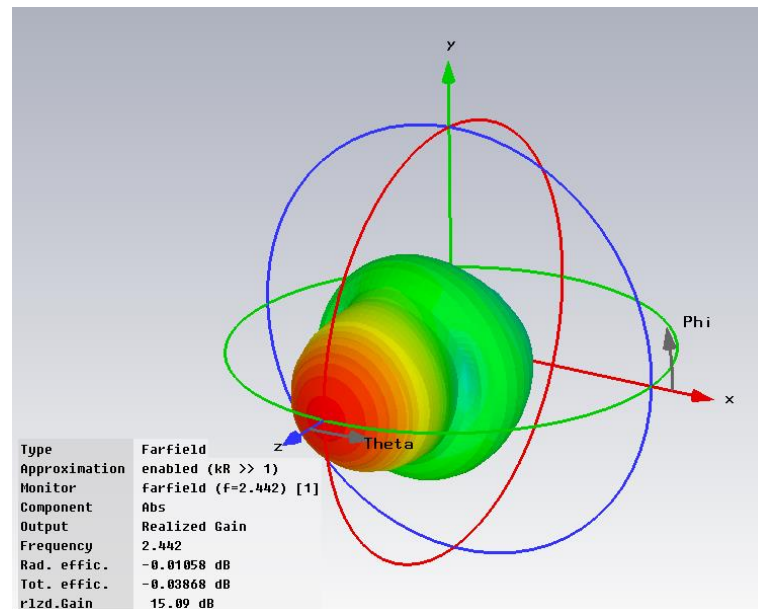


Figura 2.1: Diagrama de radiación en 3D

Pero la representación en tres dimensiones no siempre es la más adecuada, o la que aporta más información útil, por ello también se usa la representación en dos dimensiones. Este sistema se basa en representar los cortes en algún plano de las coordenadas esféricas. Los cortes más usados y a la par representativos son los E y H. El plano E está formado por el campo eléctrico en la dirección de máxima radiación de la antena, mientras que el plano H está formado por el campo magnético en dicha dirección, siendo a la vez perpendicular al plano E.



En el caso de la representación en cartesianas, lo más útil que aportan es el ancho del lóbulo principal, y la relación de este con los secundarios (SLL).

Puesto que las dimensiones del elemento son finitas y están fijas, su funcionamiento estará optimizado para un rango de frecuencias delimitado. Se puede definir el ancho de banda (BW) como la relación entre el margen de frecuencias y la frecuencia central en el que se cumplen los requerimientos especificados. La siguiente formula se muestra en forma de porcentaje con respecto a la frecuencia central.

Siendo f_{max} y f_{min} los valores de frecuencia que delimitan el ancho de banda y f_c el valor de frecuencia central.

2.3 Tipos de antenas

Se diferencian varios tipos de antenas según su frecuencia de operación.

2.3.1 Antenas de elementos

Operan entre los 10KHz y 1GHz. Se definen como antenas compuestas por elementos radiantes que son conductores de hilo y tienen una sección de un tamaño despreciable con respecto a la longitud de onda. Los monopolos, dipolos o antenas helicoidales son antes de elementos. Estas trabajan en bandas como la UHF, VHF o HF.

2.3.2 Antenas de onda progresiva

El funcionamiento de este tipo de antenas se basa en la generación de una onda progresiva a través de una estructura radiante eléctricamente larga. A medida que la onda va avanzando por la estructura, esta va perdiendo potencia, siendo la potencia restante que llega al final recogida por una carga previamente instalada evitando así las reflexiones.

En las bandas VHF y HF, su uso ha aumentado por su sencillez de montaje, mientras que para la banda de UHF se ha estandarizado más el uso de estructuras impresas.

2.3.3 Antenas de array

Se definen como la antena formada por un conjunto de varias antenas idénticas, que, al colocarlas de cierta manera, forman una sola antena con un único diagrama de radiación. La principal ventaja de los arrays es que podemos controlar la amplitud y fase de la señal de alimentación de cada uno de los elementos que conforman el array, pudiendo de esta forma que su diagrama de radiación pueda adaptarse a distintas aplicaciones.

Este tipo de antenas tienen una aplicación muy interesante mediante la construcción de antenas inteligentes. Estas son capaces de modificar su diagrama de radiación en función de las necesidades del cliente.

2.3.4 Antenas de apertura

Este tipo de antenas utiliza superficies o aperturas para direccionar el haz electromagnético, pudiendo concentrar su emisión o recepción en una determinada dirección.

Las antenas parabólicas son el ejemplo más conocido tanto para comunicaciones por satélite, como para comunicaciones radio-terrestres. El funcionamiento de esta popular antena se basa en la reflexión de las ondas electromagnéticas que emite el dispositivo emisor sobre la superficie parabólica. Otro ejemplo de antenas de apertura que cabe destacar son las antenas de bocina, muy utilizadas en el rango de las microondas.

2.4 Teoría microstrip

2.4.4 Definición y características

La línea microstrip es un tipo de línea de transmisión fabricada en tecnología impresa y utilizada para transmitir señales de microondas. Se basa en una fina lamina (respecto a la

longitud de onda λ , que se propaga por ella) de material conductor de espesor t y anchura w , que está separada del plano de masa por una fina capa de material dieléctrico de altura h y constante dieléctrica ϵ_r .

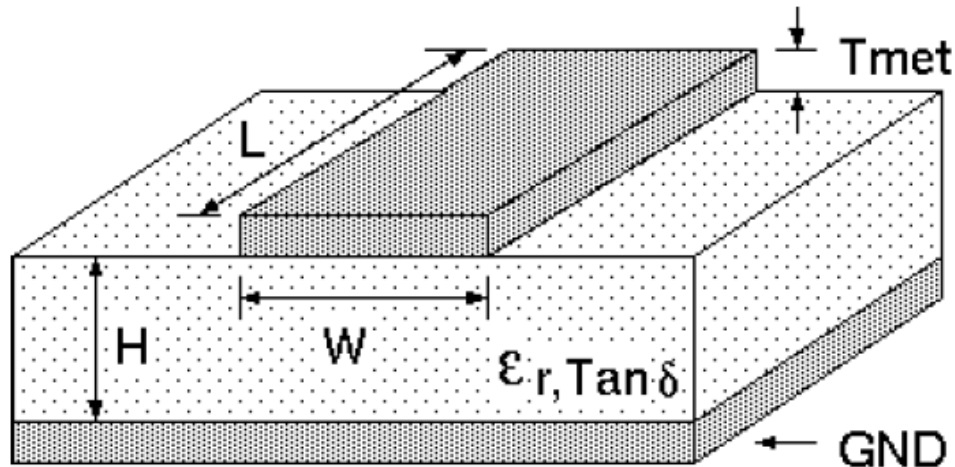


Figura 2.3: Estructura de la línea microstrip

En esta tecnología podemos encontrar tanto ventajas como desventajas. Entre las ventajas, una de las principales es que las longitudes se reducen de manera importante comparadas con sus valores en el espacio libre debido al confinamiento de campos en el sustrato. Además, son mucho más baratas que la tecnología de guía de onda, puesto que pueden ser construidas utilizando placas de circuito impreso (PCB), siendo más baratas y ligeras.

Entre sus inconvenientes, cabe destacar que tienen poca capacidad para el manejo de energía, tienen mayores pérdidas que otras tecnologías y son más susceptibles al ruido al no encontrarse cerradas.

2.4.5 Alimentación microstrip

La línea de microstrip es alimentada mediante coaxiales, pudiendo ser de forma vertical u horizontal.

Sonda coaxial vertical: El conductor exterior se conecta al plano de masa, y el conductor interno pasa a través del sustrato hasta la pista. Podemos controlar la adaptación de la impedancia de entrada con la posición del conector con respecto al final de la pista.

Sonda coaxial horizontal: Se conecta el alma a la línea microstrip y el conductor exterior al plano de masa. Es muy sencilla de construir, pero puede provocar muchas pérdidas en alta frecuencia al encontrarse el alma del conector desprotegida. Este tipo de conexión es el que se usará en este TFG.

2.5 Tecnologías WiFi y WiMAX

El aumento de dispositivos portátiles durante estos últimos años ha provocado que la demanda de redes inalámbricas se haya ido incrementando. Esto ha sido provocado por los nuevos estilos de vida donde se precisa de conectividad a las redes locales o a internet en todo momento.

2.5.4 WiFi

A finales de los años noventa, Nokia y Symbol Technologies crearon la asociación Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), que posteriormente, en el año 2003, fue renombrada a WiFi Alliance (Wireless Fidelity). Su propósito fue la creación de una alianza que permitiese fomentar la tecnología inalámbrica, asegurándose a su vez de que los equipos que la implementaran fueran compatibles. La primera norma que se creó fue 802.11b, ésta permitía que todos los equipos pudieran trabajar juntos sin ningún tipo de problemas. Esta norma utilizaba la banda de 2,4GHz, y alcanzaba una velocidad de hasta 11Mbps. Posteriormente se creó la norma 802.11a, Más adelante, la norma 802.11g, volvió a la banda 2,4GHz, pero esta vez, se mejoró la velocidad de transmisión de datos hasta los 54Mbps.

El estándar 802.11n fue ratificado por el IEEE en 2009. Está basado en los estándares previos que tienen las anteriores tecnologías, pero añadiendo una tecnología muy importante, MIMO (Multiple Input – Multiple Output). Esta tecnología usa múltiples antenas tanto transmisoras como receptoras para mejorar el funcionamiento del sistema. También combina las dos bandas de frecuencia utilizadas en las normas anteriores; 2,4 y 5 GHz que utilizadas simultáneamente permiten a esta norma alcanzar velocidades de transmisión de datos de hasta 108 Mbps, que posteriormente se mejoró hasta alcanzar los 600 Mbps teóricos.

Actualmente se ha estandarizado el uso de la norma 802.11ac. Esta tecnología se basa en la n, pero aumentando el ancho de banda hasta 160MHz.

2.5.1 WiMAX

WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) es de las tecnologías más recientes. Se usa en un amplio abanico de aplicaciones tales como servicios de banda ancha como Voice over IP, VoIP. El WiMAX 802.16 permite llegar a lugares donde no lo hace la cobertura de red tradicional, como zonas rurales, donde se necesita amplia cobertura en zonas con población dispersada.

El WiMAX se puede clasificar en dos categorías: WiMAX Fijo y WiMAX Móvil.

En el caso del WiMAX Fijo, usa el estándar IEEE 802.16-2004 que fue diseñado para el acceso mediante red fija. Normalmente se utiliza para proveer internet de banda ancha en zonas rurales, usando las bandas 2.5, 3.5 y 5.8 GHz.

Para el WiMAX Móvil se usa una revisión del estándar IEEE 802.16-2004, en este caso denominado IEEE 802.16e. Esta tecnología es muy similar al GSM/UMTS y actualmente se encuentra en competición con el LTE, con un mayor despliegue y uso. Esta norma permite la movilidad de los dispositivos.

El estándar más actual es 802.16m-2011. Esta revisión permite alcanzar hasta 1Gbps de transferencia en WiMAX fijo y hasta 100Mbps en movimiento con WiMAX Mobile.

3 Antena multibanda Wifi y WiMAX

3.1 Introducción

En esta sección se pretende diseñar una antena multibanda, que pueda trabajar en las frecuencias de Wifi y WiMAX que se establecen para el mercado europeo. Esta antena será de tipo microstrip alimentada a través de líneas de transmisión. Se pretende que la antena sea de unas dimensiones reducidas para que pueda ser insertada en dispositivos portátiles.

3.2 Criterios de diseño

En esta sección se tratarán las condiciones más importantes que debe cumplir la antena y que hay que tener en cuenta a la hora de diseñarla.

3.2.1 Frecuencias de funcionamiento y ancho de banda

El diseño de la antena se basa en dos tecnologías principalmente, Wifi y WiMAX.

La tecnología Wifi tiene varias bandas de funcionamiento, como se comentó en el apartado 2.5.1. Los estándares IEEE 802.11b y IEEE 802.11g utilizan la banda de 2.4GHz, disponible casi universalmente. Sin embargo, el estándar IEEE 802.11a se aplica a la banda de los 5GHz, pudiendo diferenciar entre banda baja (5.15 a 5.25 GHz), banda media (5.25 a 5.35 GHz) y banda alta (5.725 a 5.825 GHz). Además, en esta banda también funcionan los estándares IEEE 802.11n y IEEE 802.11ac, que además utilizan la banda de los 2.4 GHz.

En cuanto al WiMAX, se tendrá en cuenta la banda 3.5 GHz, utilizada por varios estándares IEEE 802.16x.

3.2.2 Sustrato utilizado

Para el diseño de las antenas de este trabajo de fin de grado se ha utilizado el dieléctrico Teflon PTE (lossy), de espesor $H = 0.787$ mm, una constante dieléctrica $\epsilon_r = 2.5$ y una tangente de pérdidas $\tan\delta = 0.001$.

3.2.3 Simulación con conector

Para las simulaciones realizadas con el software CST Studio Suite se ha decidido añadir el efecto producido por un conector SMA de 50Ω que se soldará posteriormente a la línea de alimentación de la antena.

El conector que se va a utilizar para este TFG es el modelo 526-5791 de RS Online. En software de simulación CST Studio Suite puede diseñarse un conector similar y conectarlo a la línea de transmisión de alimentación de la antena para comprobar cuál es el efecto producido por el conector en la simulación. A continuación, en la Figura 3.0 se muestra el conector real y el conector diseñado y utilizado en la simulación.

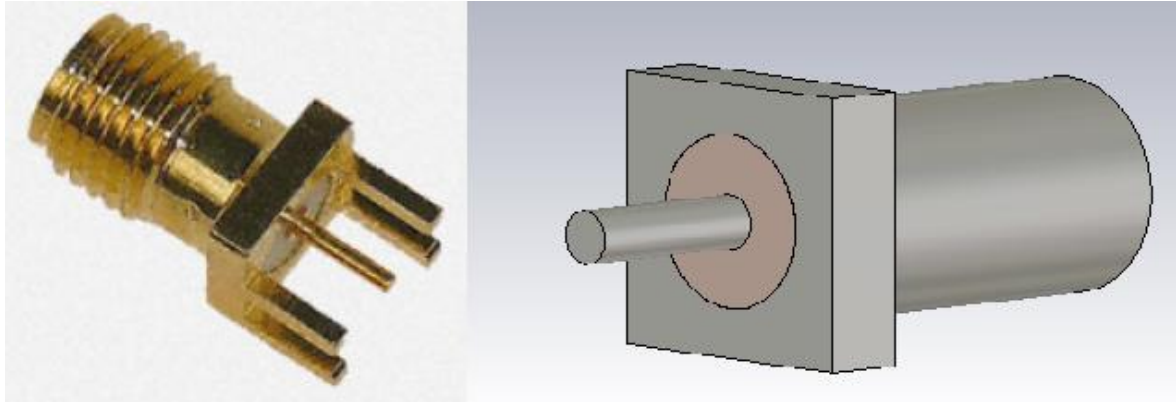


Figura 3.0: Conector SMA 50 Ω real y simulación

Una de las principales ventajas de realizar la simulación con el conector es que no es necesario adaptar las dimensiones del puerto que se colocaría en la línea de transmisión a 50 Ω .

3.3 Diseño de la antena WiFi y WiMAX sin filtro

En esta sección del trabajo de fin de grado se procede a realizar los cálculos necesarios para el diseño de la antena propuesta, así como la realización de las simulaciones necesarias en el programa CST para que ésta cumpla con las especificaciones de diseño que se enumeran en la sección anterior.

Para ello se va a separar la antena en dos partes, que luego finalmente se juntarán dando lugar a la antena definitiva.

3.3.1 Monopolo 3.5 GHz

Antes de empezar a construir la antena, es necesario calcular los parámetros que permitan obtener una impedancia de 50 Ω en la línea de alimentación de la antena. Para realizar este cálculo, se utiliza una herramienta del software ADS cuyo nombre es LineCalc, que permite calcular los parámetros implicados en la obtención de la impedancia que deseamos.

Utilizando los parámetros de sustrato, los cuales has sido descritos en el apartado 3.2.2, y usando esta herramienta se obtiene que la anchura de línea para obtener la impedancia es $W_l = 2 \text{ mm}$.

Partiremos de un $\lambda/4$ cuya banda de frecuencia esté centrada en 3.5 GHz. De la siguiente forma calcularemos cual debe ser la longitud de esta pista.

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

Sustituimos los valores de c_0 y f :

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{3.5 \cdot 10^9}$$

$$\lambda_\mu = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{effect}}}}$$

Siendo $\epsilon_{\text{effect}} = 2.5$

Realizando los cálculos se obtiene una longitud de onda de 13.55 mm.

Se cuenta con un plano de masa que cuenta con las siguientes dimensiones: 30x15 mm. Para optimizar el espacio en el dieléctrico, se decide doblar la pista en forma de L.

En la siguiente figura se muestra como sería la primera parte de la antena y de la cual partiremos para llegar a la antena final.

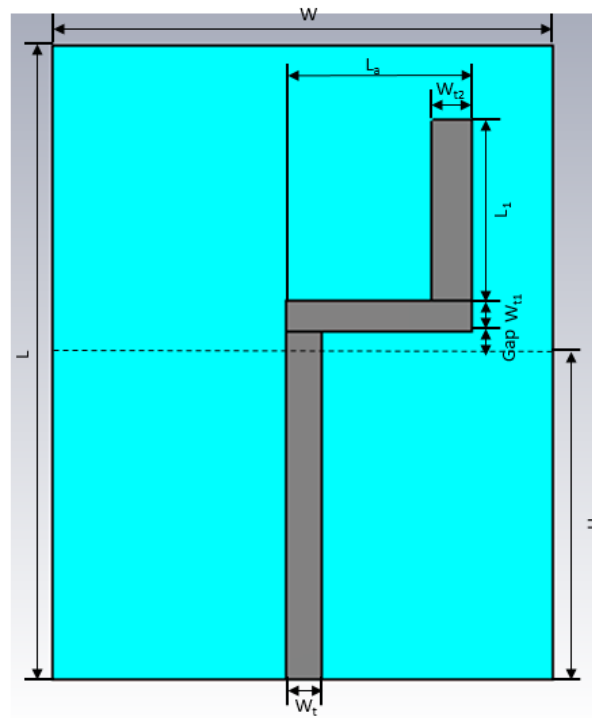


Figura 3.1: Esquema monopolo 3.5 GHz

Como medidas iniciales usaremos un L_1 de 10 mm, Gap de 1mm, W_t de 2 mm, W_{t1} de 2 mm, L_a de 10 mm y W_{t2} de 2 mm. A continuación, se realizará una simulación paramétrica para obtener unos valores de los anteriores parámetros que se aproximen a los óptimos y permitan cumplir la especificación inicial de que una de las bandas esté centrada en 3.5GHz.

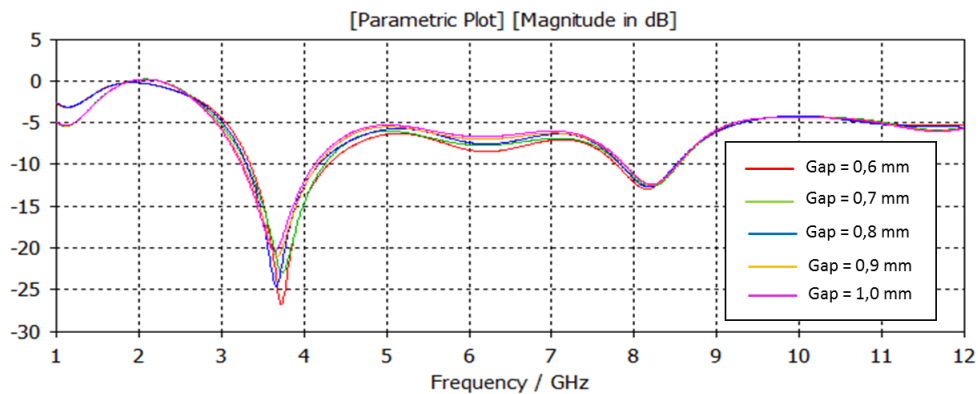


Figura 3.2: Simulación del parámetro Gap

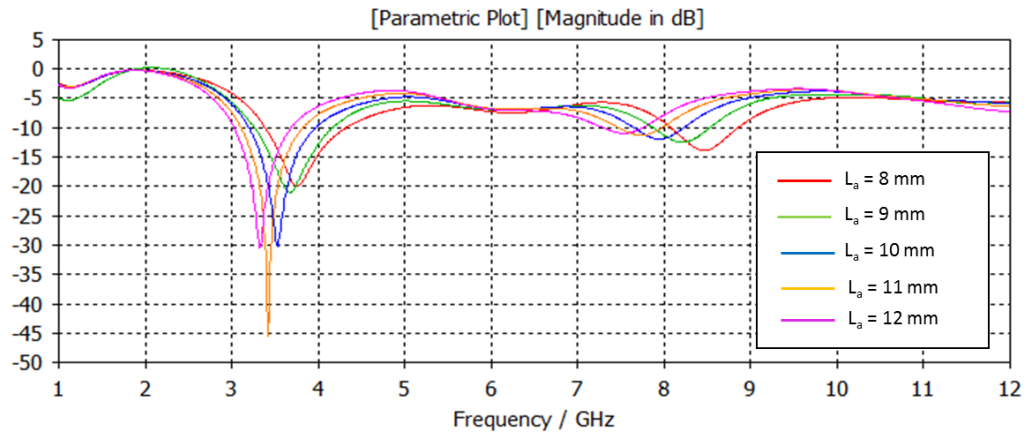


Figura 3.3: Simulación del parámetro L_a

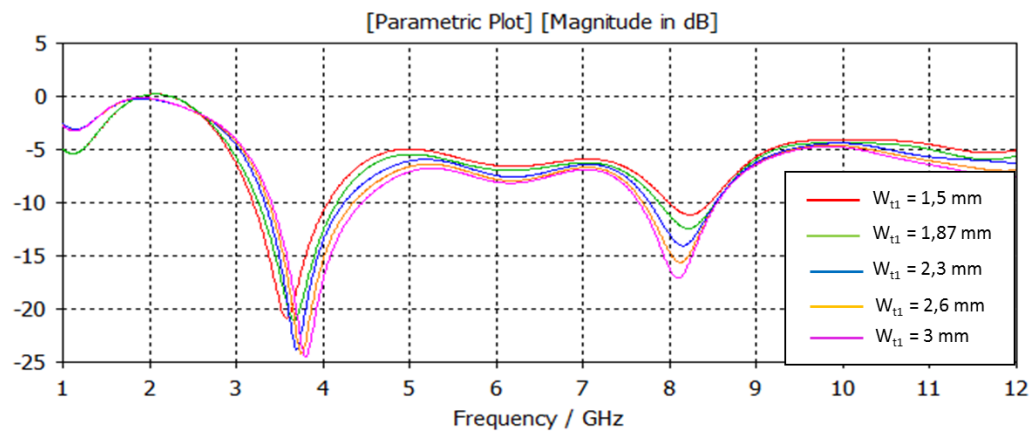


Figura 3.4: Simulación del parámetro W_{t1}

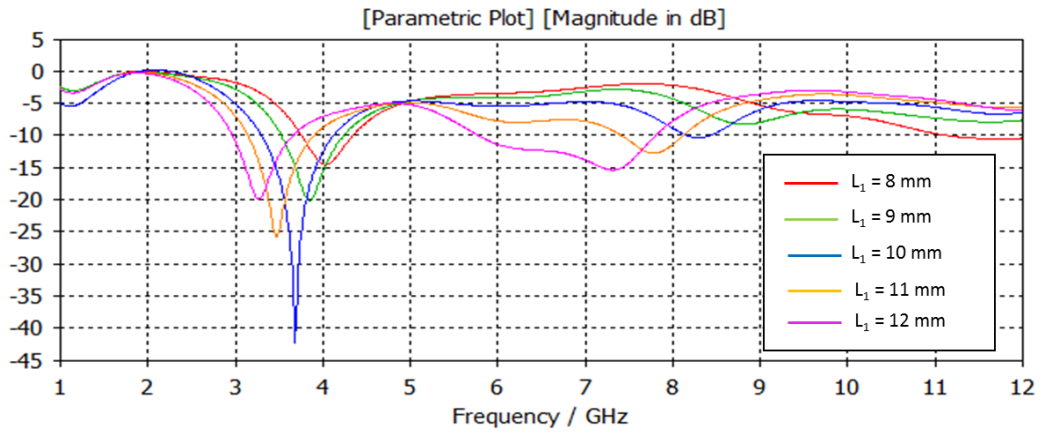


Figura 3.5: Simulación del parámetro L_1

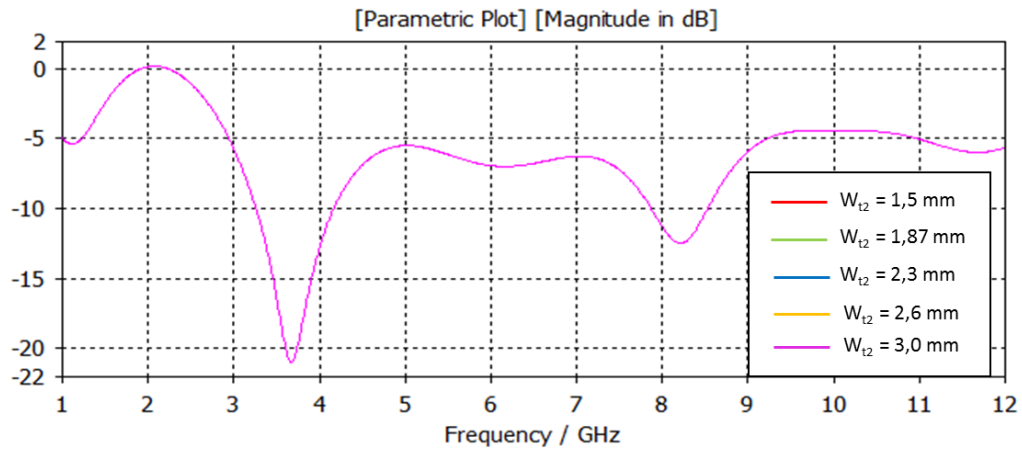


Figura 3.6: Simulación del parámetro W_{t2}

En la Figura 3.2 se puede observar como con mínimas variaciones en el Gap, se puede centrar el ancho de banda en valores cercanos a 3.5 GHz, es por eso, que 0.9 mm es un valor aceptable para este diseño.

A medida que se va aumentando el valor de L_a , se aprecia como la banda de trabajo ($|S_{11}| < -10 \text{ dB}$) va bajando en frecuencia, y como se puede observar en la Figura 3.3, el valor más cercano a 3.5 GHz es 10 mm. Si se modifica el grosor de esta pista, W_{t1} , se puede observar cómo va aumentando en frecuencia, como se puede determinar en la Figura 3.4, un valor de 1.9 mm es suficiente para tener la banda de frecuencia centrada en la frecuencia solicitada.

En cuanto al valor de L_1 , en la Figura 3.5 se puede observar como a medida que vamos aumentando el valor, la vaguada va disminuyendo en frecuencia, y se llega a la conclusión de que un valor de 10.5 mm permiten a la antena inicial cumplir con la condición de que trabaje en la banda de 3.5 GHz

Como se aprecia en la Figura 3.6 se puede llegar a la conclusión de que W_{t2} no afecta de ninguna forma al coeficiente de reflexión.

Una vez realizadas las pertinentes simulaciones, se llega a la conclusión de que los parámetros a utilizar serán los siguientes:

L_1	W_t	W_{t1}	L_a	W_{t2}	Gap
10.5 mm	2 mm	1.9 mm	10 mm	2.5 mm	0.9 mm

Tabla 3.1: Medidas monopolo de 3.5 GHz

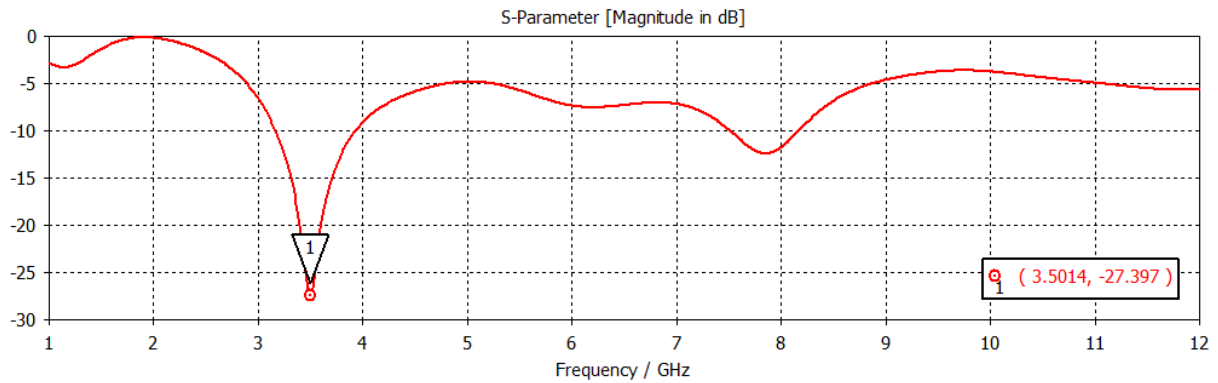


Figura 3.7: Coeficiente de reflexión para monopolo de 3.5 GHz

3.3.2 Monopolo de 2.5 GHz

Para la banda centrada en 2.5 GHz, se van a repetir los mismos pasos que en el caso anterior, calculando la longitud de la pista con un $\lambda/4$. Para ello se repiten los cálculos, ahora con la nueva frecuencia.

$$\lambda_0 = \frac{C_0}{f}$$

Se sustituye los valores de C_0 y f :

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{2.5 \cdot 10^9}$$

$$\lambda_\mu = \frac{\lambda_0}{\sqrt[2]{\epsilon_{\text{effect}}}}$$

Siendo $\epsilon_{\text{effect}} = 2.5$

Obteniendo una longitud de 18.97 mm.

Al igual que en el proceso anterior, para conservar un tamaño reducido del dieléctrico, se va a doblar el monopolo, ahora con forma de U inversa. La geometría final se muestra en la siguiente figura.

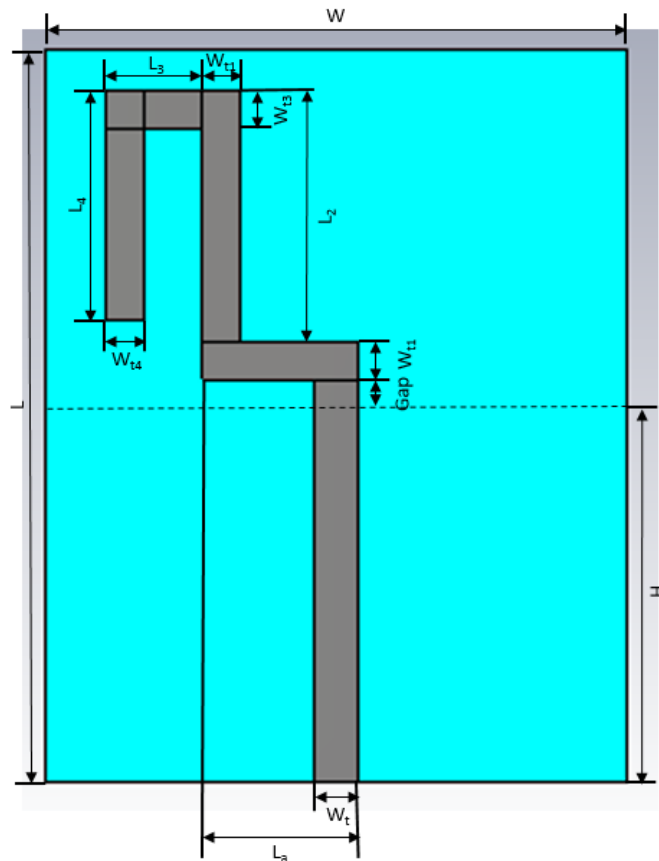


Figura 3.8: Esquema monopolo 2.5 GHz

Como medidas iniciales, en este caso, se va a utilizar el mismo W_{t1} y Gap que en el caso anterior, un L_b de 10 mm, un L_2 de 10 mm, un L_3 de 5 mm, un L_4 de 10 mm, un W_{t3} de 2 mm y un W_{t4} de 2 mm.

Siguiendo el proceso del caso anterior, se van a realizar simulaciones paramétricas para encontrar los valores óptimos que permitan tener la banda de los 2.5 GHz. A continuación, se muestran las gráficas donde se representan las simulaciones para los distintos parámetros.

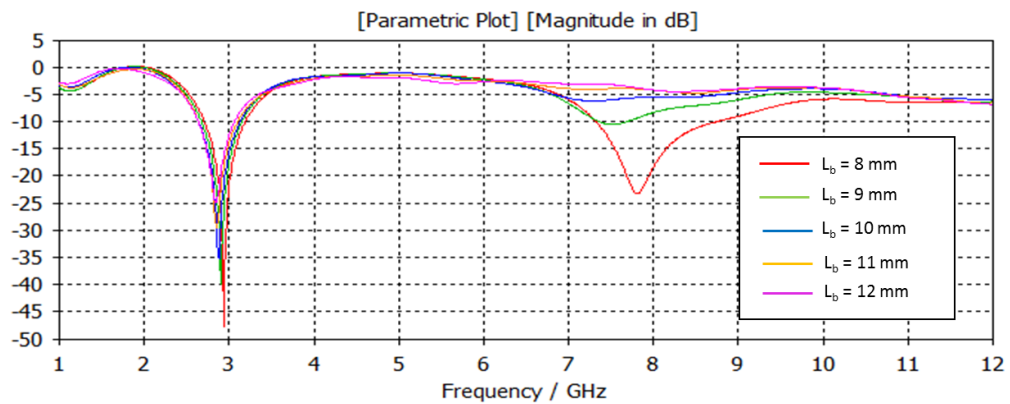


Figura 3.9: Simulación del parámetro L_b

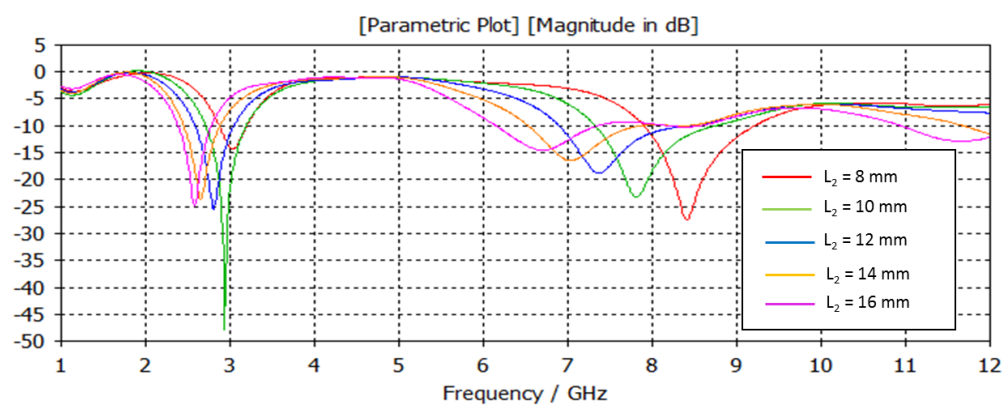


Figura 3.10: Simulación del parámetro L_2

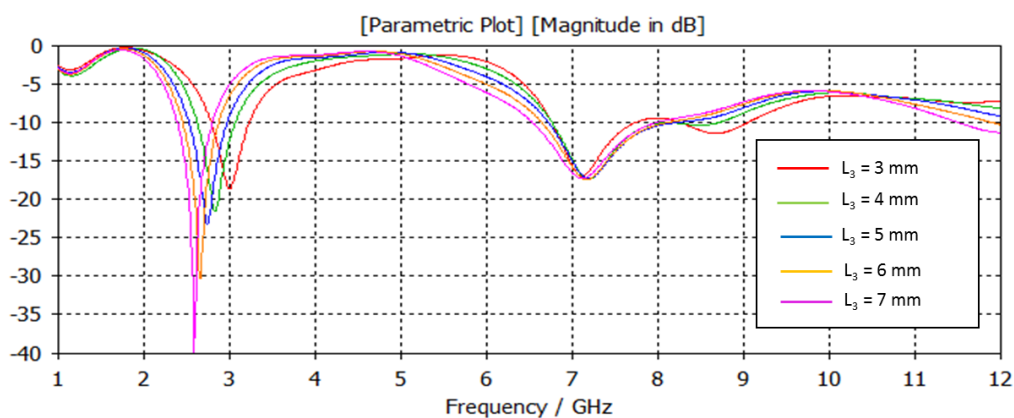


Figura 3.11: Simulación del parámetro L_3

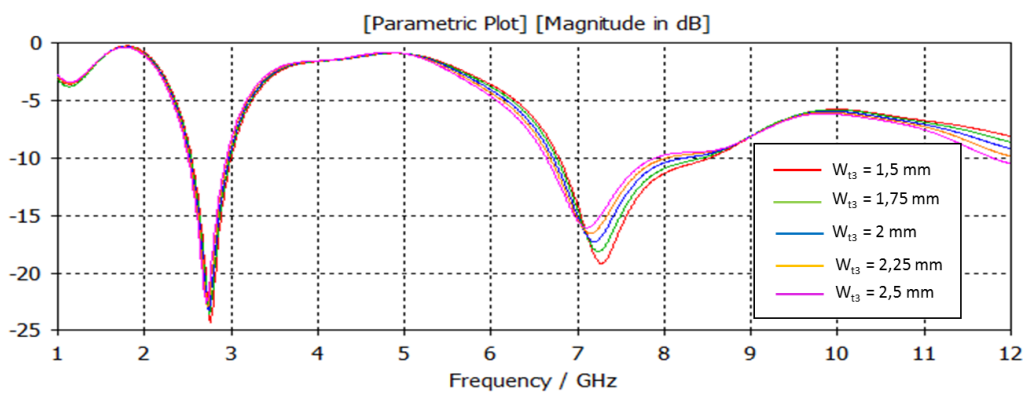


Figura 3.12: Simulación del parámetro W_{13}

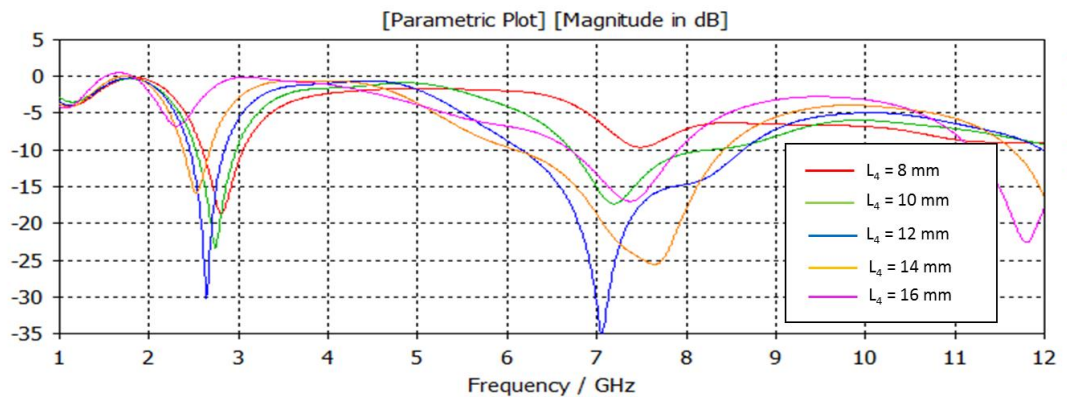


Figura 3.13: Simulación del parámetro L_4

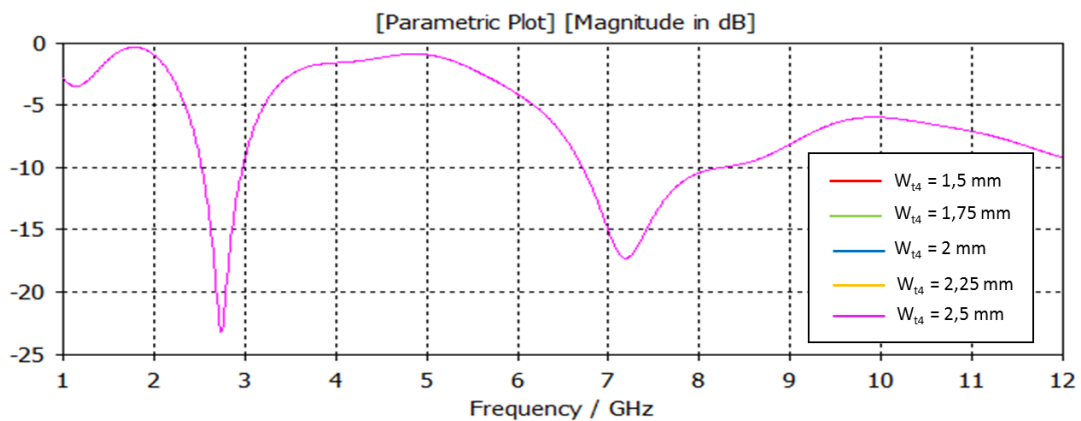


Figura 3.14: Simulación del parámetro W_{t4}

Se realiza una simulación paramétrica de L_b , cuyo resultado se puede ver en la Figura 3.9, donde se observa que varía muy poco a medida que se aumenta el valor, y por temas de espacio, se decide elegir 8 mm.

Realizando lo mismo con L_2 , se puede observar en la Figura 3.10 como un valor entre 12 y 14 hace que la banda de trabajo ($|s_{11}| < -10 \text{ dB}$), esté centrada en 2.5 GHz aproximadamente.

En la Figura 3.11 se simula L_3 , en este caso se elige 5 mm, que, aunque no cumple con estar centrada en 2.5 GHz, es necesario por temas de espacio.

La anchura de esta pista apenas afecta al ancho de banda como se puede comprobar en la Figura 3.12 que muestra la simulación paramétrica de W_{t3} . Simulando L_4 podemos ver como el valor que necesitamos es 14 mm, que permite tener la banda centrada en 2.5 GHz, ésto se puede comprobar en la Figura 3.13.

Ya, por último, simulando la anchura de esta última pista, W_{t4} , se comprueba cómo no afecta para nada en la banda de frecuencia, quedándonos con el valor inicial. En la Figura 3.14 se puede observar como el coeficiente de reflexión no varía.

Después de realizar los pertinentes barridos paramétricos, se llega a la conclusión de que los valores ideales para este elemento radiante son los siguientes.

L_b	L_2	L_3	L_4	W_{t3}	W_{t4}
8 mm	13 mm	5 mm	14 mm	2 mm	2 mm

Tabla 3.2: Medidas monopolo de 2.5 GHz

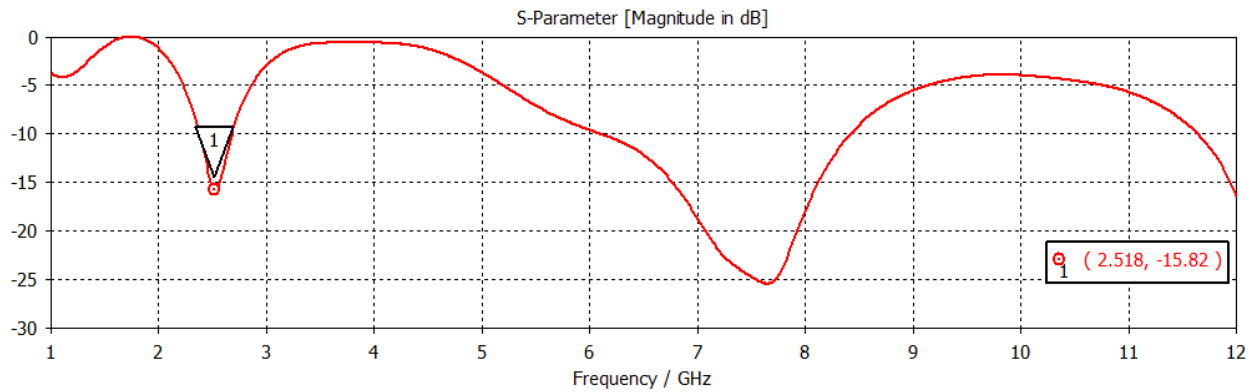


Figura 3.15: Coeficiente de reflexión para monopolo de 2.5 GHz

3.3.3 Unión de los dos monopolos

Una vez realizados los dos diseños con los valores óptimos para ambos, se unirán los dos y se verá cual es el resultado de esta unión. Además, la configuración geométrica de la antena y el coeficiente de reflexión se muestran en las dos figuras adjuntas a continuación.

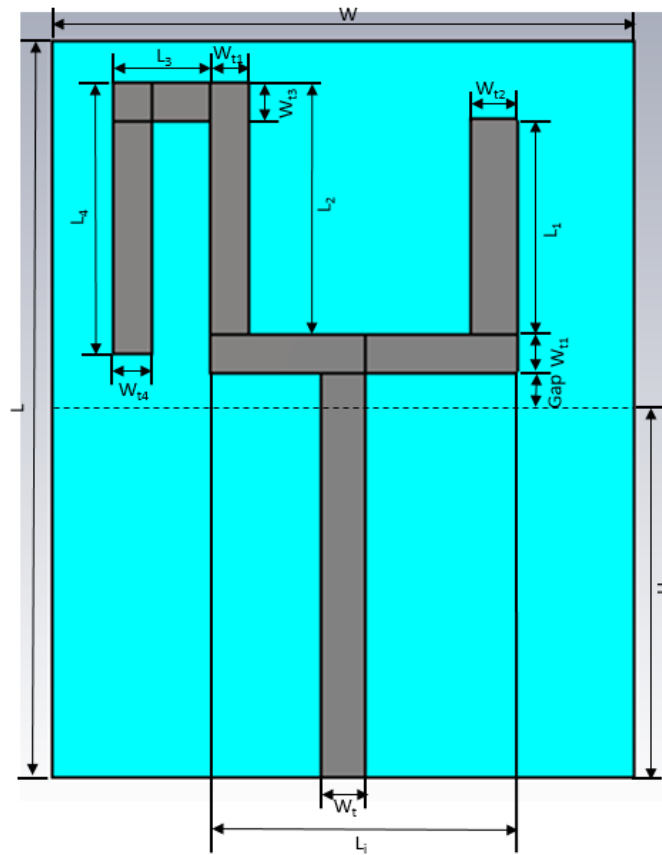


Figura 3.16: Esquema de antena final

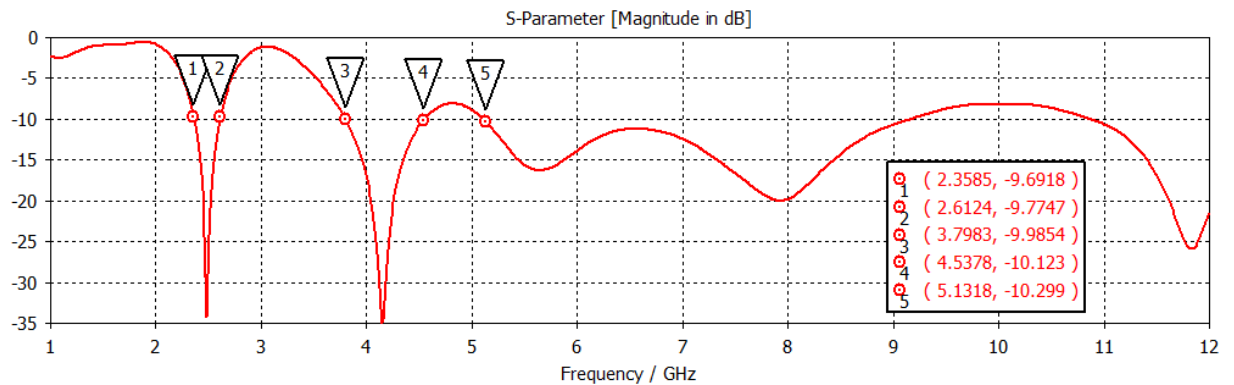


Figura 3.17: Coeficiente de reflexión tras la unión de los dos monopolos.

Para que la antena cumpla las tres bandas propuestas, se va a volver a realizar simulaciones paramétricas de las siguientes especificaciones.

Como se ha podido observar en las gráficas de las simulaciones anteriores, los parámetros que más afectan a la antena de forma directa son L_1 , L_2 y L_4 .

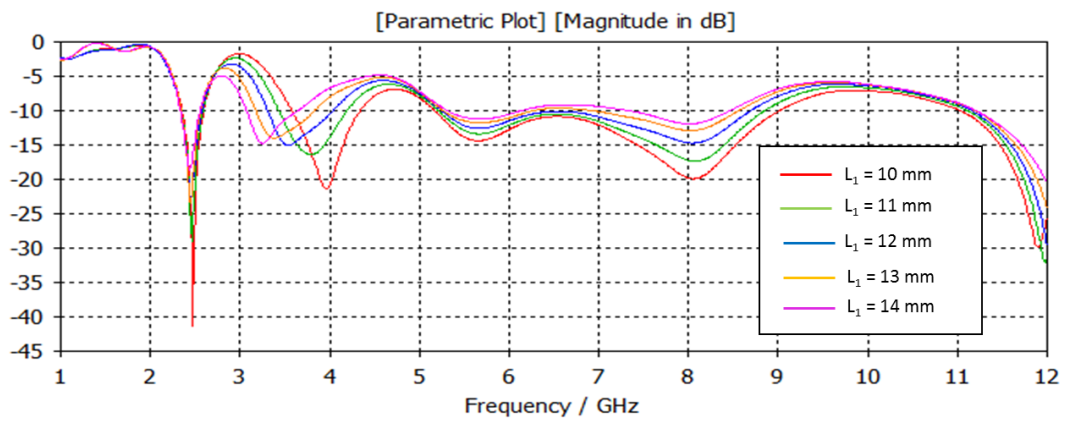


Figura 3.18: Simulación del parámetro L_1

Aumentando el valor de L_1 se puede comprobar como la banda de trabajo que debería estar en 3.5 GHz va bajando en frecuencia hasta poder situarla en un valor cercano, este caso se da con 13.6 mm. Esto se puede observar en la Figura 3.18, que realiza el barrido paramétrico de L_1 entre 10 y 14 mm.

Los valores óptimos se muestran en la siguiente tabla, y en la Figura 3.19 se muestra el coeficiente de reflexión usando esos valores.

L_1	W_t	W_{t1}	L_i	W_{t2}	Gap
11.7 mm	2 mm	1.9 mm	17 mm	2.4 mm	0.9 mm

L_2	W_{t3}	W_{t4}	L_3	L_4	
13 mm	2 mm	2 mm	5 mm	14 mm	

Tabla 3.3: Medidas antenna una vez se han unido los dos monopolos.

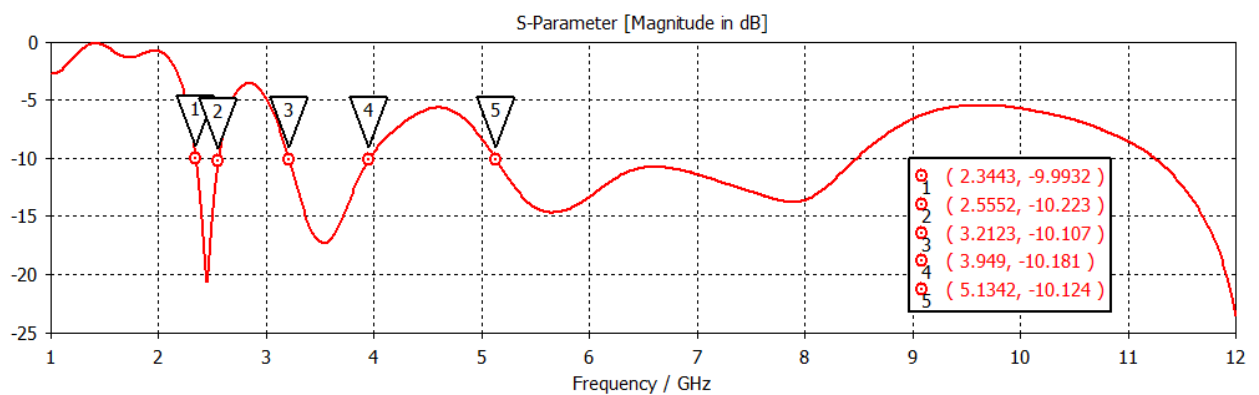


Figura 3.19: Coeficiente de reflexión de la antenna propuesta.

3.3.4 Conexión del conector SMA

Una vez se cumplen todas las especificaciones que se piden, se procede a conectar el conector a la línea de transmisión de $50\ \Omega$. En las dos siguientes graficas se muestra cómo quedaría la antenna con el conector, y cuál es su diagrama de pérdidas.

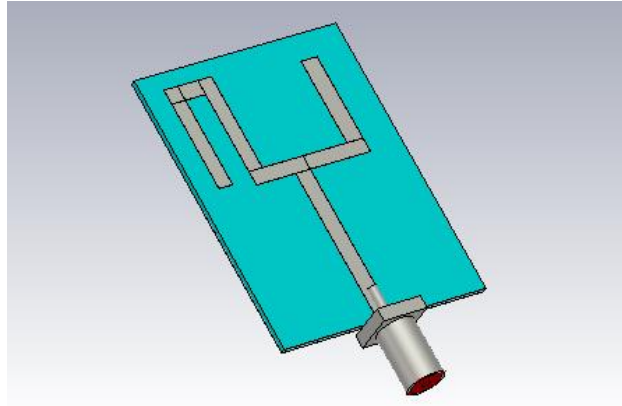


Figura 3.20: Diseño de la antenna en CST con el conector SMA en la línea de alimentación de la antenna.

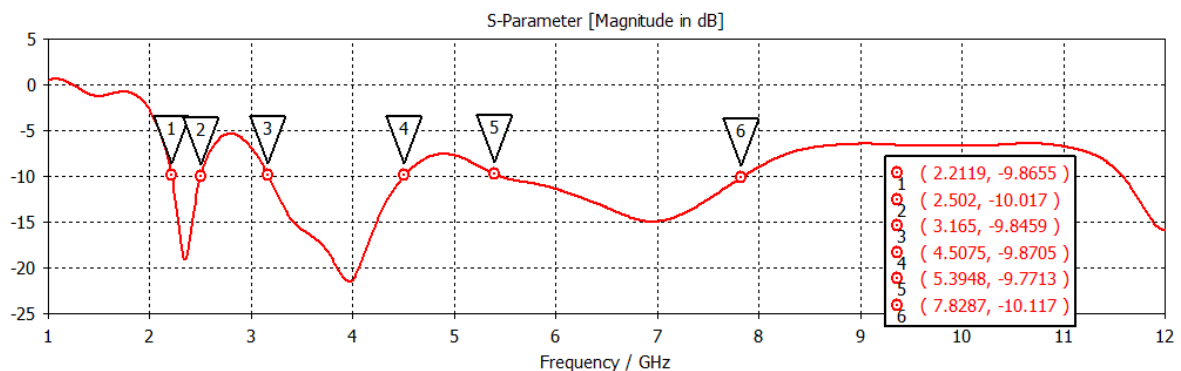


Figura 3.21: Coeficiente de reflexión una vez añadido el conector SMA.

Una vez que se ha conectado, se puede observar cómo se han producido ciertas variaciones con respecto a la antenna sin conector, esto es debido a que el conector introduce ciertas perdidas en el sistema, y por ello se debe volver a retocar algunos valores para que vuelva a cumplir las especificaciones.

Se vuelven a realizar simulaciones paramétricas, pero esta vez solo sobre valores que afecten a la antenna directamente, como puede ser L_1 , L_4 o W_{t1} .

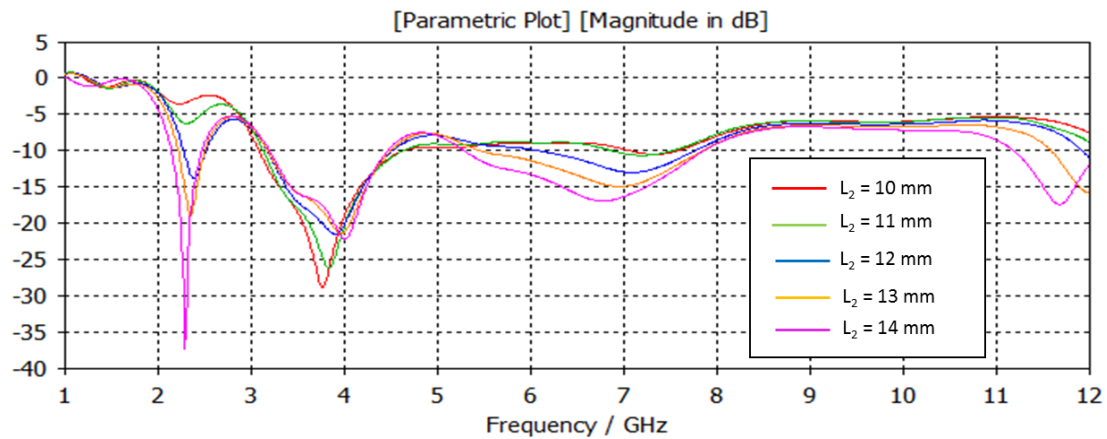


Figura 3.22: Simulación del parámetro L_2

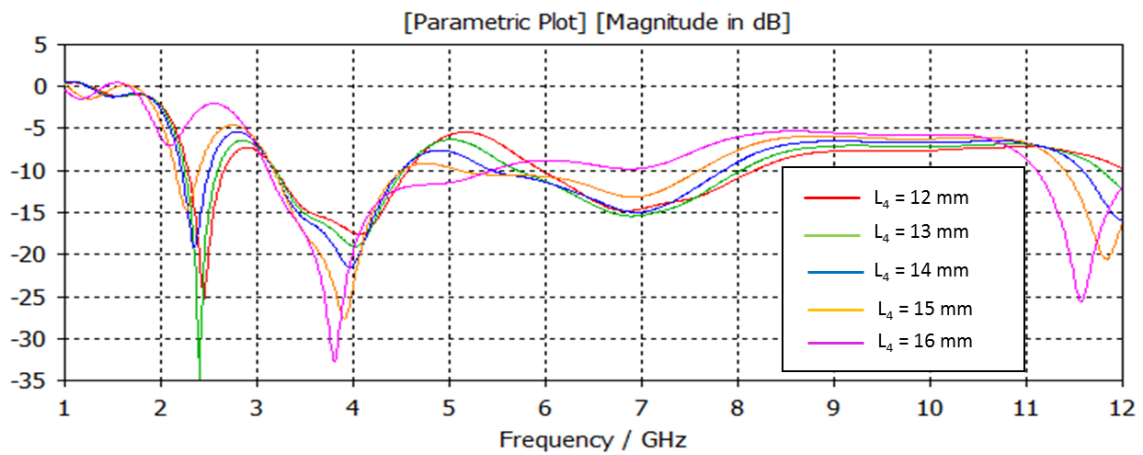


Figura 3.23: Simulación del parámetro L_4

En la Figura 3.22 se observa como a medida que se aumenta el valor de L_2 , la banda de trabajo en 3.5 GHz, se desplaza a frecuencias superiores, también se desplaza ligeramente a frecuencias superiores la banda de 2.5 GHz, por ello, con un valor de L_2 de 13 mm es adecuado para tener esta última banda en su debido lugar.

Modificando ahora el valor de L_4 , se pretende arreglar la banda de trabajo situada en 4 GHz. En la Figura 3.23 se simula L_4 entre 12 y 16 mm, y se puede observar como a medida que se aumenta su valor, la banda disminuye en frecuencia, pero también afecta a la banda de 2.5 GHz, por ello el valor de 12 mm es adecuado.

Una vez se ha conseguido que la antena junto con el conector, cumpla los criterios de diseño, se muestra la tabla de los valores de todos los parámetros de la antena, así como una captura del diseño final de la antena.

L_1	W_t	W_{t1}	L_i	W_{t2}	Gap
11.7 mm	2 mm	1.9 mm	17 mm	2 mm	0.9 mm

L_2	W_{t3}	W_{t4}	Espesor	L_4	L_3
13 mm	2 mm	2 mm	0.03 mm	12 mm	5 mm

L	W	H			
30 mm	20 mm	20 mm			

Tabla 3.4: Medidas finales de la antena con conector SMA

Finalizando este diseño con la gráfica del diagrama de pérdidas de la antena final.

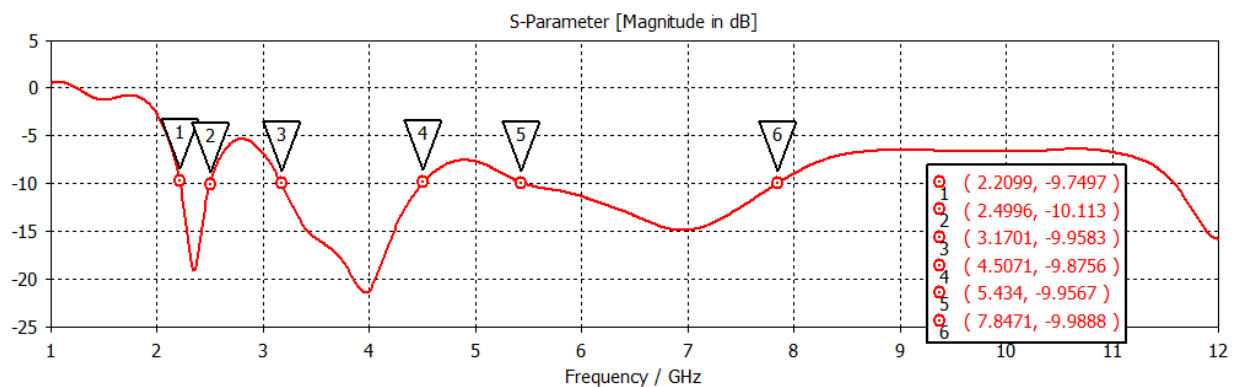


Figura 3.24: Coeficiente de reflexión para el diseño final de la antena WiFi y WiMAX.

Una vez finalizado el diseño, se muestra en la Figura 3.24 el coeficiente de reflexión de la antena con el conector acoplado. Se puede comprobar cómo se cumplen los parámetros de diseño y podemos diferenciar tres bandas de trabajo, de 2.2 a 2.5 GHz, de 3.1 a 4.5 GHz y de 5.4 a 7.8 GHz.

En el Anexo B se pueden comprobar los diagramas de radiación para esta antena, con el conector incorporado. Como se puede observar, corresponden a un dipolo, como cabe esperar de este diseño.

3.4 Diseño de la antena WiFi y WiMAX con filtro

En esta sección del trabajo de fin de grado se procede a añadir un filtro de altas frecuencias a la antena anterior para que elimine las bandas que se encuentren por encima de 6 GHz. Para ello, se diseñará primero un filtro de altas frecuencias, que posteriormente se añadirá a la línea de alimentación de la antena. Esta simulación también se llevará a cabo con el software de simulación CST.

3.4.1 Diseño del filtro de altas frecuencias

Se va a construir un filtro que elimine las bandas de que se sitúen por encima de 6 GHz. Este filtro estará formado por dos líneas de transmisión en $\lambda/4$ en circuito abierto, una vez se acoplen a la línea de alimentación de la antena, éstas forman un cortocircuito dirigiendo toda la energía de la antena en altas frecuencias al plano de masa.

El diseño inicial del filtro se puede comprobar en la siguiente figura.

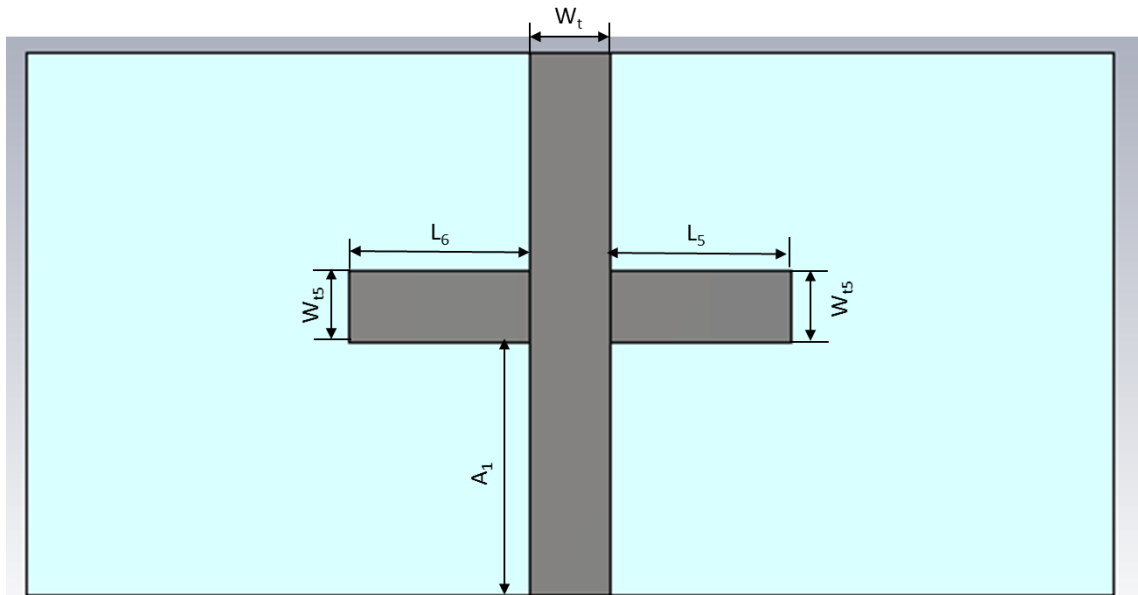


Figura 3.25: Esquema del filtro de alta frecuencia a diseñar.

En esta sección se procede a realizar los cálculos necesarios para averiguar cuáles son las dimensiones de las dos secciones que conforman este filtro de alta frecuencia. Para ello partiendo de que son $\lambda/4$.

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

Se sustituyen los valores de c_0 y f :

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 10^9}$$

$$\lambda_\mu = \frac{\lambda_0}{\sqrt[2]{\epsilon_{reflect}}}$$

Siendo $\epsilon_{\text{reflect}} 2.5$

$$\lambda_{\mu} = \frac{\lambda_0}{\sqrt[2]{2.5}} = 0.0237$$

Aunque la sección es un $\lambda/4$, no se comporta así, por ello está más aproximado a 0.22λ , siendo el resultado final:

$$L = 0.22 \lambda_{\mu}$$

Las secciones tendrán una dimensión de 5.21 mm.

Para la creación de este filtro se va a utilizar el mismo programa de simulación que para la anterior antena. Además, se utilizará también el barrido paramétrico para determinar cuáles son los valores óptimos de este filtro.

Partiendo de unas medidas inventadas, que se aproximen a los cálculos anteriores, se va a ajustarlas con un barrido paramétrico para cada medida. Las medidas iniciales son las siguientes: $A_1 = 7$ mm, $W_t = 2.2$ mm (heredada del diseño de la primera antena), $W_{t5} = 2$ mm, $L_5 = 5$ mm y $L_6 = 5$ mm. Posteriormente, se comenzará con los barridos paramétricos de los distintos parámetros.

A continuación, se muestran las gráficas del coeficiente de transmisión para los distintos barridos paramétricos.

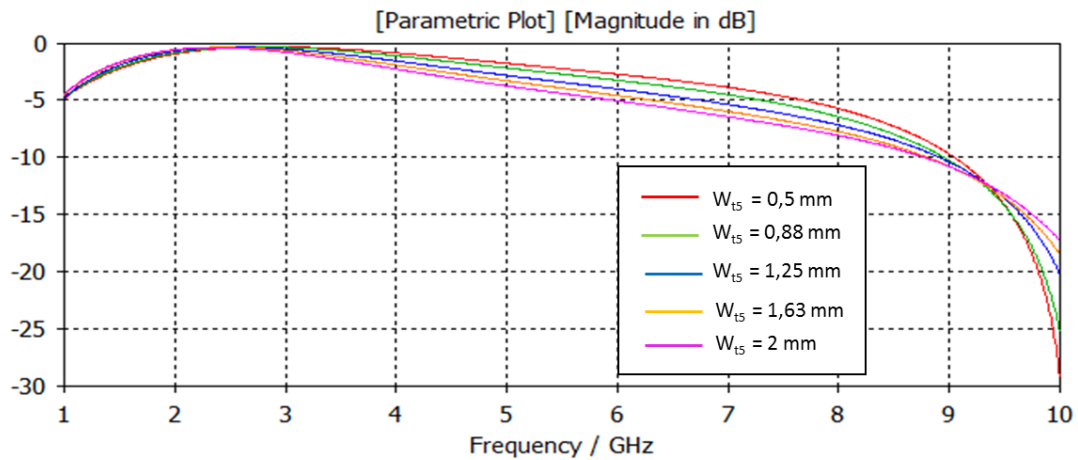


Figura 3.26: Simulación del parámetro W_{t5}

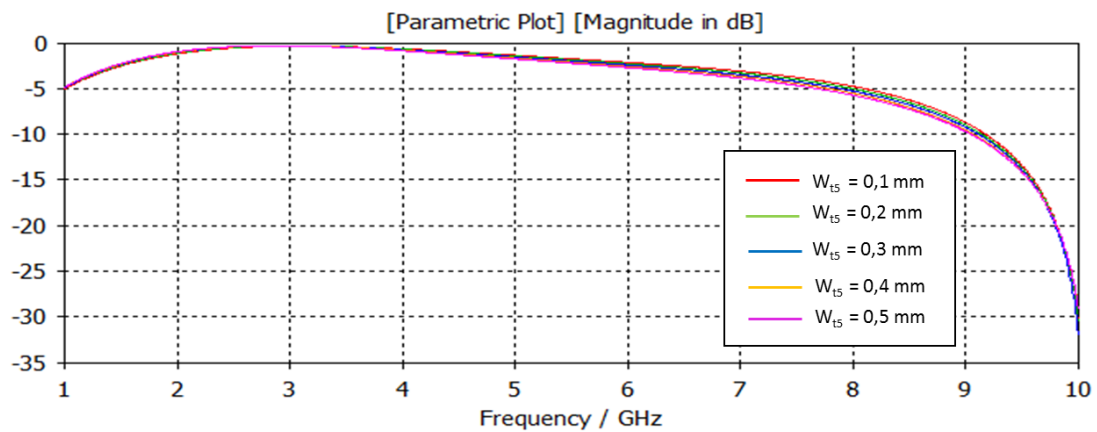


Figura 3.27: Simulación del parámetro W_{15} acotado entre 0.1 y 0.5 mm

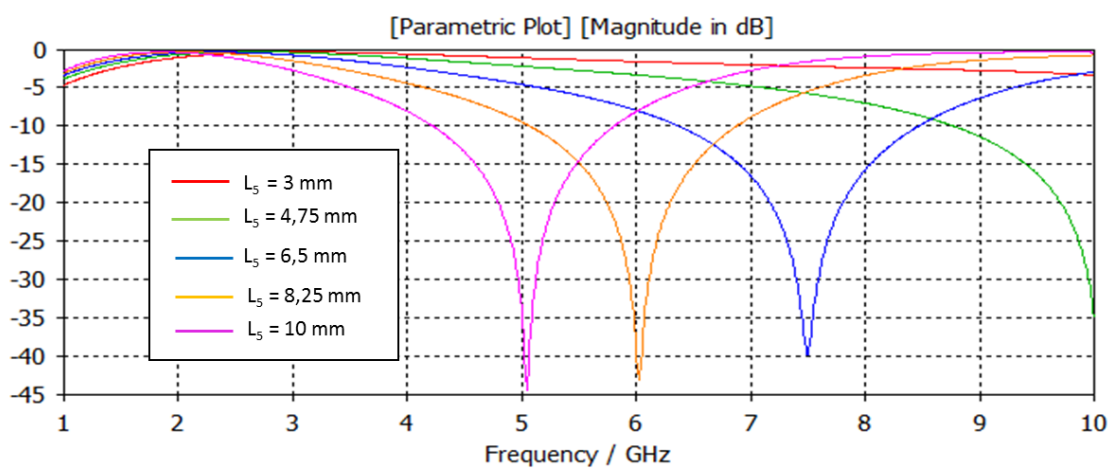


Figura 3.28: Simulación del parámetro L_5 y L_6 (puesto que son simétricos solo se simula uno de ellos para no duplicar la gráfica).

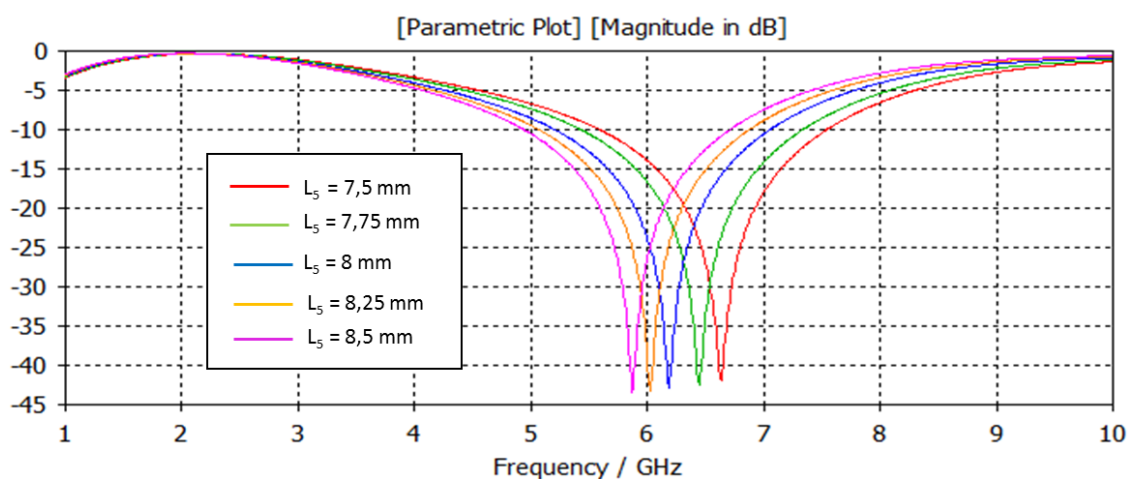


Figura 3.29: Simulación del parámetro L_5 y L_6 entre 7.5 y 8.5 mm.

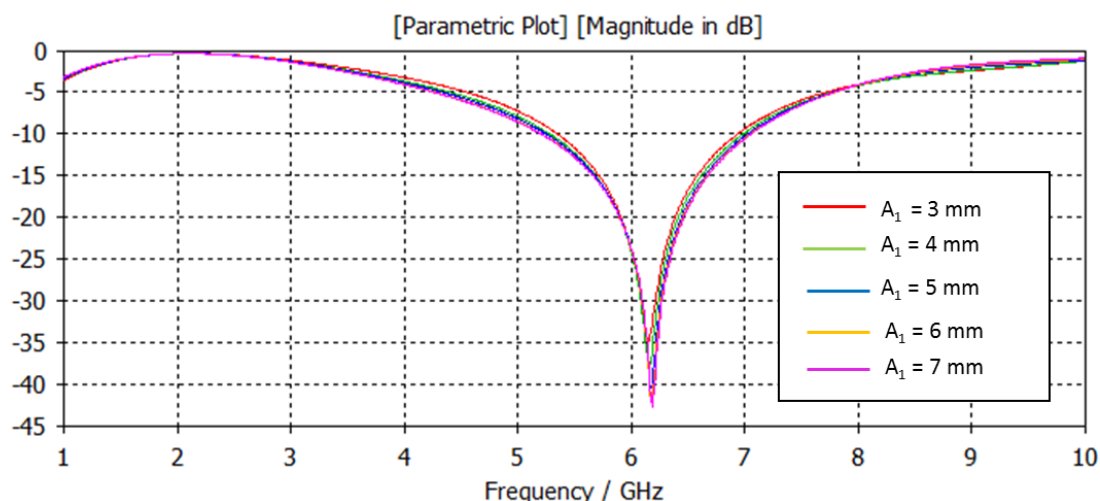


Figura 3.30: Simulación del parámetro A_1

En la Figura 3.26 se observa como a media que la anchura de la pista va disminuyendo, la ganancia del filtro mejora en la zona de 4 a 9 GHz. Esto se debe a que a medida que se disminuye la anchura de la pista, se hace mayor el ancho de banda del filtro. Como se puede observar en la Figura 3.27, se aprecia como un valor de ancho de 0.1 mm, es el mejor valor que se puede usar para tener la mejor ganancia del filtro.

Realizando un barrido paramétrico sobre la longitud de las secciones, se puede observar como a media que la longitud aumenta, disminuye en frecuencia, esto está representado en la Figura 3.28 y se llega a la conclusión de que una longitud de 8.25 mm. Si realizamos un barrido paramétrico más profundo sobre el valor de 8.25 mm se podrá obtener el valor óptimo que permite construir el filtro. En la Figura 3.29 se puede observar como un valor de 8 mm centra el filtro en 6.3 GHz, lo que permite mantener intacta la banda de 5.5 GHz.

Por último, simulando la distancia que separa el principio de la línea de alimentación de la antena con las secciones del filtro, se puede apreciar como la posición de estas apenas afecta a la ganancia del filtro. Esto se puede comprobar en la Figura 3.30.

Una vez realizadas las simulaciones, se muestra a continuación la tabla con los valores óptimos del filtro, así como una captura de coeficiente de reflexión y otra del coeficiente de reflexión.

L_5	L_6	W_{t5}	W_{t6}	Altura
8 mm	8 mm	0.1 mm	0.1 mm	7 mm

Tabla 3.5: Medidas del filtro de altas frecuencias.

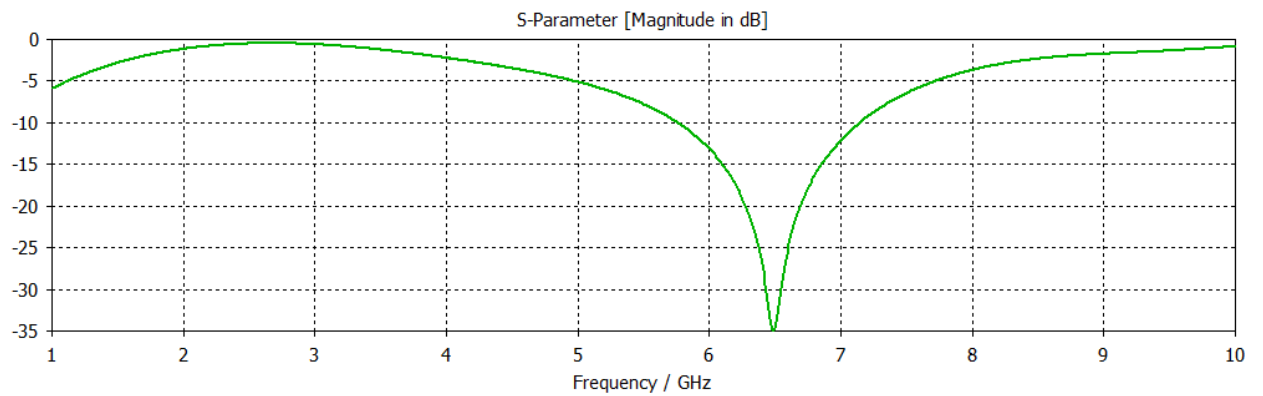


Figura 3.31: Coeficiente de transmisión para el filtro de altas frecuencias diseñado.

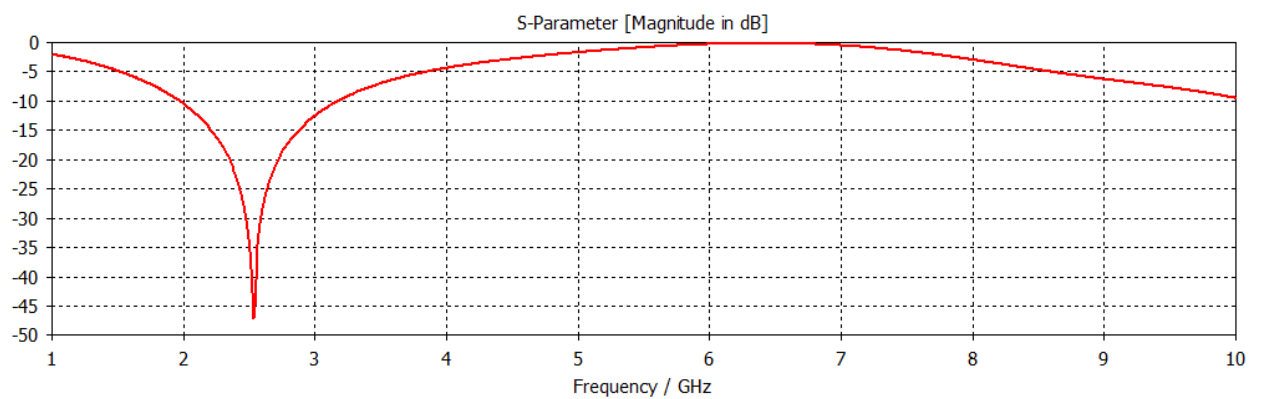


Figura 3.32: Coeficiente de reflexión para el filtro de altas frecuencias diseñado

La Figura 3.33 muestra la geometría final del filtro, que posteriormente será incluida en el primer diseño de la antena y que así pueda cumplir con las especificaciones de este diseño.

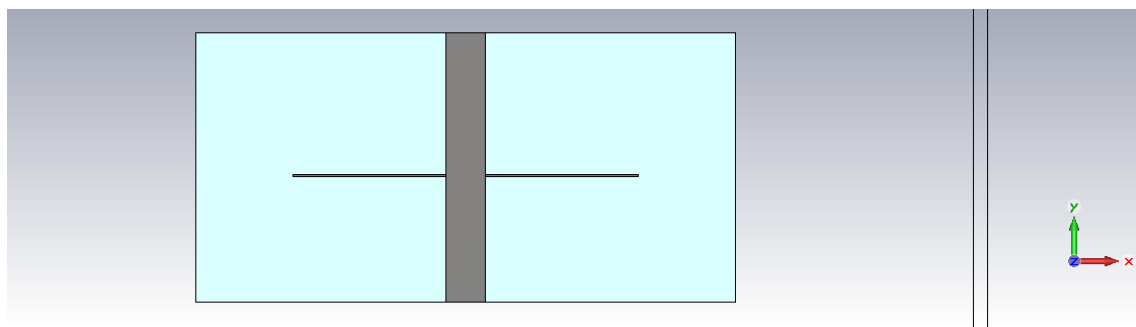


Figura 3.33: Geometría final del filtro diseñado.

3.4.2 Unión de la antena con el filtro

A continuación se procede a añadir el filtro anterior al primer diseño de la antena. Se adjunta una captura de como sería la antena una vez añadido el filtro.

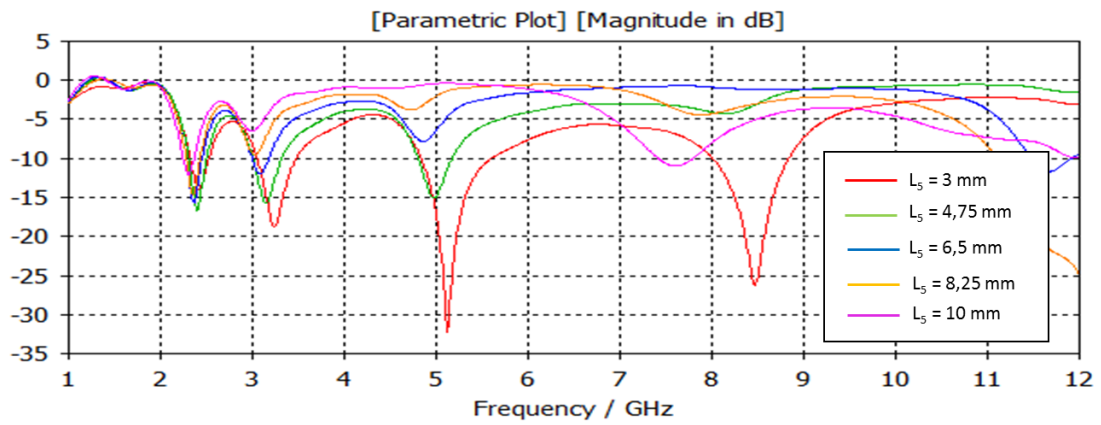


Figura 3.36: Simulación del parámetro L_5

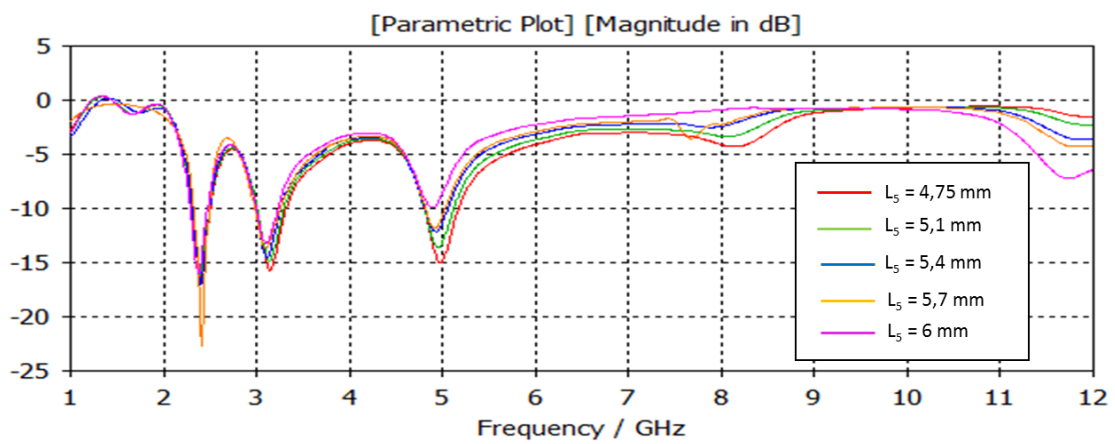


Figura 3.37: Simulación del parámetro L_5 entre 4.75 y 6 mm.

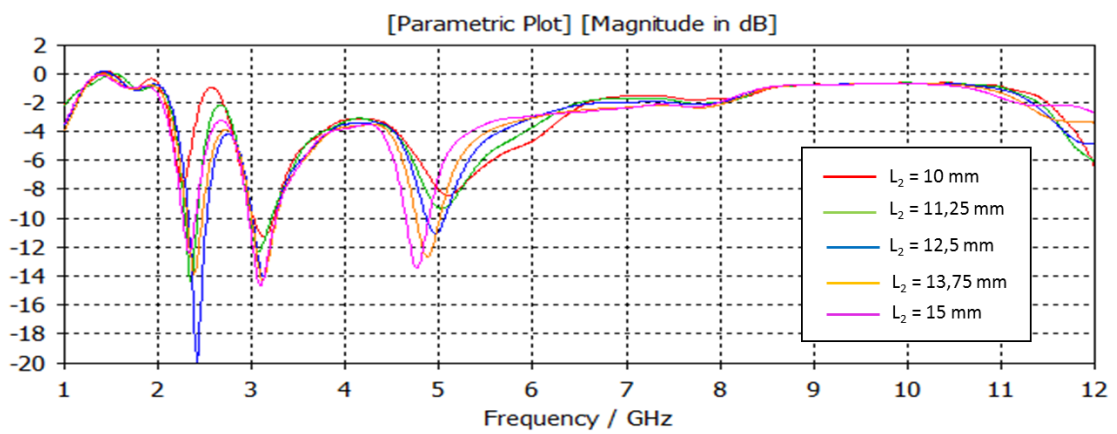


Figura 3.38: Simulación del parámetro L_2

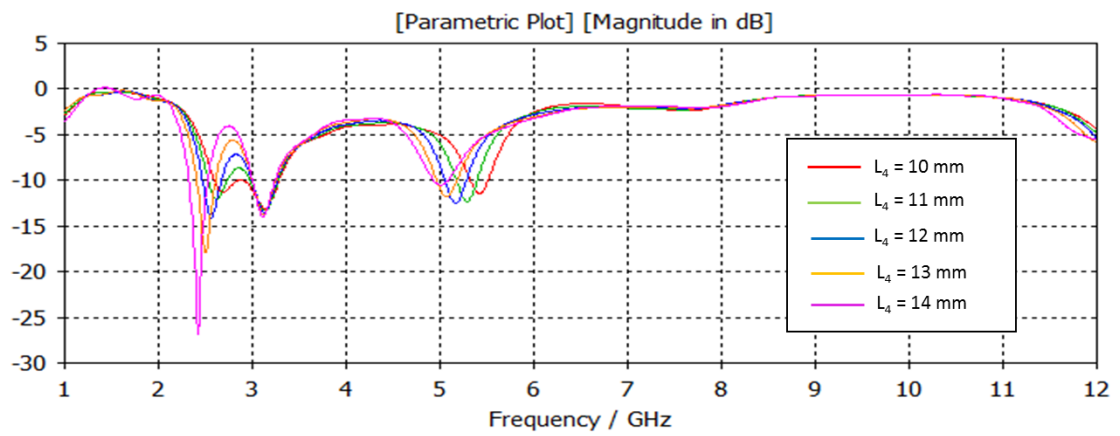


Figura 3.39: Simulación del parámetro L_4

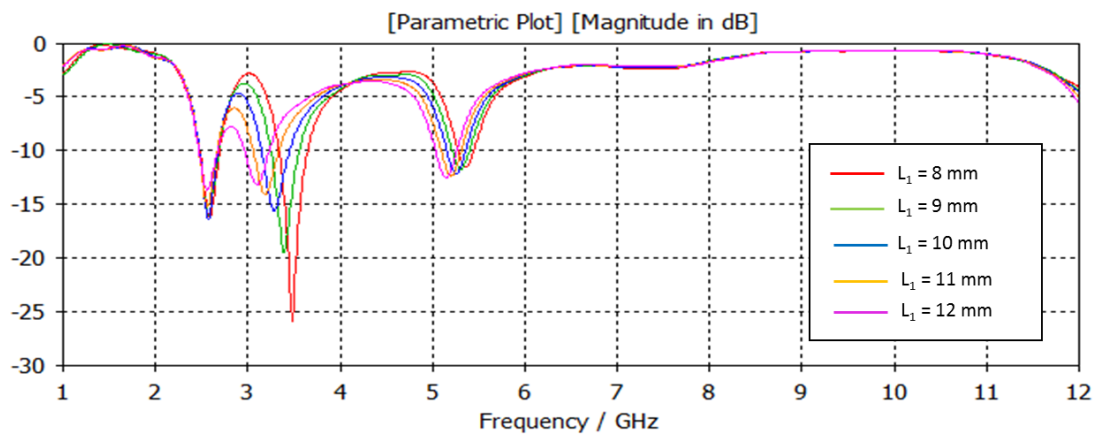


Figura 3.40: Simulación del parámetro L_1

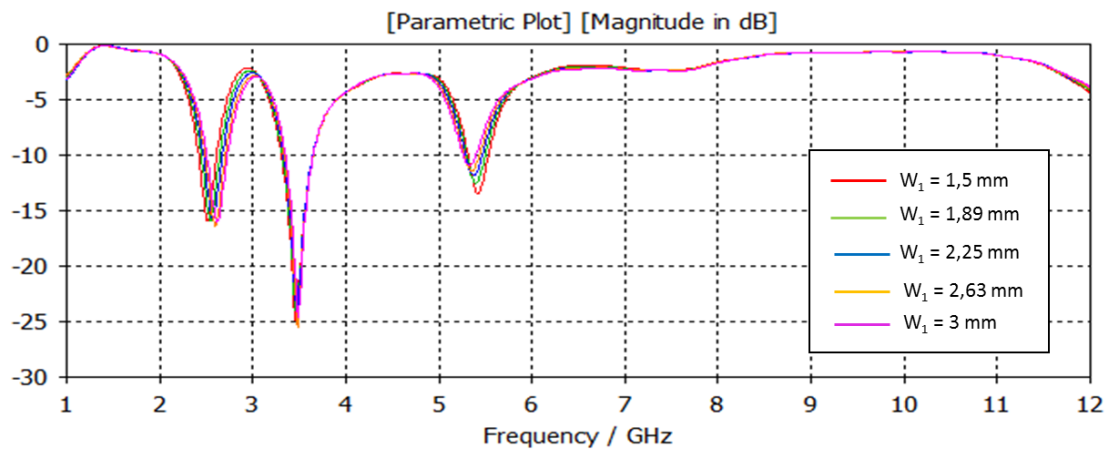


Figura 3.41: Simulación del parámetro W_1

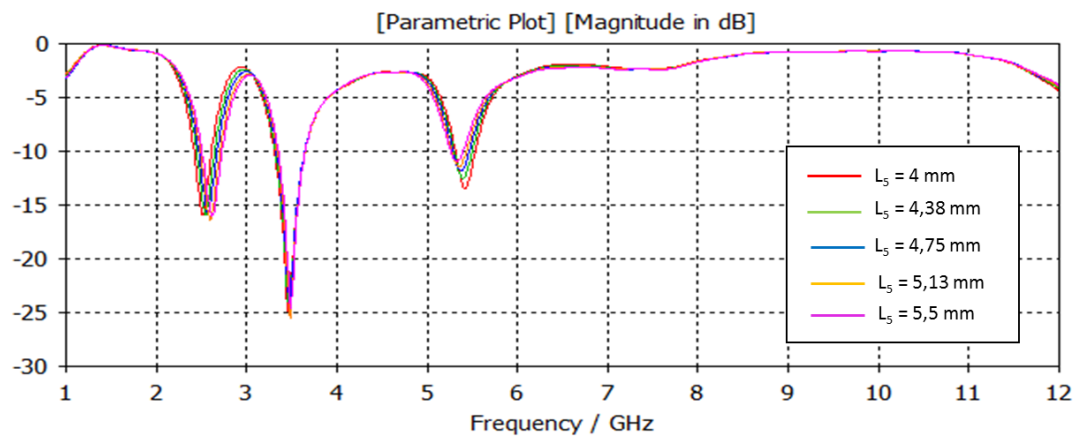


Figura 3.42: Simulación del parámetro L_5 esta vez entre valores más pequeños.

Como se puede observar en la Figura 3.36, a medida que se va aumentando la longitud de las secciones que conforman el filtro, se puede observar como este se va haciendo mas evidente entorno a las frecuencias de 6 y 7 GHz, por ello una longitud de entre 4.75 y 6 mm sería apta para este diseño.

Haciendo un barrido parametrico de L_5 más profundo, entre los valores mencionados anteriormente, se puede apreciar como un valor de 5.5 mm sería correcto para este filtro. La simulación de estos valores más detallada se puede comprobar en la Figura 3.37.

Simulando L_2 entre 10 y 15 mm se puede ver como afecta esta longitud a la antena. A medida que se va aumentado el valor, como se puede observar en la Figura 3.38, el filtro actúa mejor, por ello una longitud de 12 mm parece mas que suficiente en principio para cumplir las especificaciones.

En cuanto al parametro L_4 , a medida que su longitud va aumentando desde los 10 mm fijados inicialmente, se puede comprobar como las bandas en 2.5 y 3.5 GHz se van marcando mejor, pero por el contrario la banda de 5.5 GHz baja en frecuencia, por ello una longitud de 12 mm mantiene el equilibrio entre todas las bandas.

En la Figura 3.39 se muestra el barrido parametrico para L_1 , el cual afecta directamente a la banda de 3.5 GHz. Por ello se puede observar como a medida que el valor aumenta, la banda se desplaza a frecuencias inferiores a 3.5 GHz, haciendo que el valor inicial de 8 mm parezca mas que correcto para esta banda, puesto que valores mas pequeños desplazarían la banda a frecuencias superiores. La Figura 3.40 muestra lo comentado anteriormente.

Realizando un barrido parametrico sobre W_1 , se puede apreciar como modificar el ancho de esta pista apenas mejora o empeora las bandas o su ganancia. Esto puede comprobarse en la Figura 3.41.

Volviendo a simular L_5 , pero esta vez entre valores mas cercanos, 4 y 5.5 mm, el filtro apenas mejora, pero se puede observar que para 4 mm la banda de 2.5 GHz presenta mejores resultados al desplazarse un poco hacia las bajas frecuencias. La Figura 3.42 muestra la simulacion completa.

Una vez realizadas las simulaciones, se llega a la conclusión de que los valores que mejor se ajustan a las características propuestas para esta antena son los que se muestran en la tabla 3.6 que puede encontrarse a continuación.

L ₁	W _t	W _{t1}	L _i	W _{t2}	Gap
8 mm	2 mm	1.9 mm	17 mm	2.4 mm	0.9 mm

L ₂	W _{t3}	W _{t4}	Espesor	L ₄	L ₃
12 mm	2 mm	2 mm	0.03 mm	10 mm	5 mm

L	W	H	L ₅	L ₆	W _{t5}
30 mm	20 mm	20 mm	4 mm	4 mm	0.1 mm

W _{t6}					
0.1 mm					

Tabla 3.6: Medidas de la antena con el filtro de altas frecuencias.

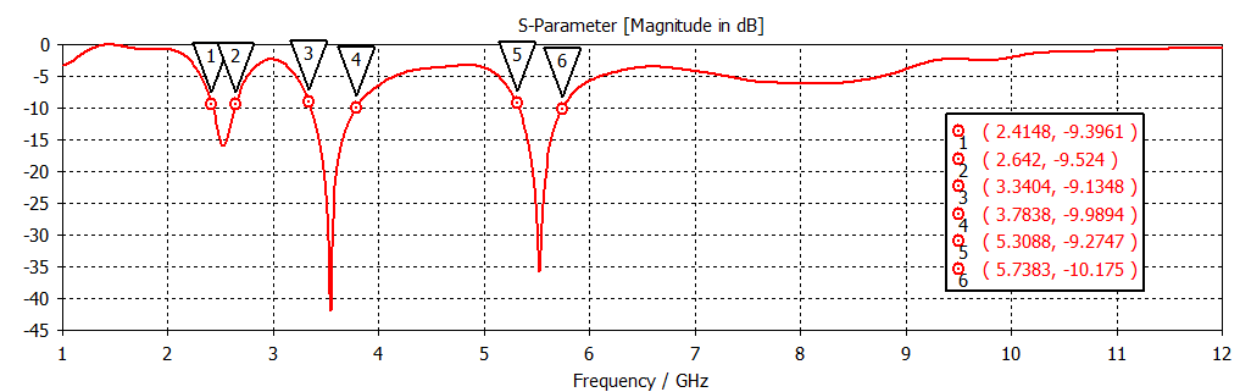


Figura 3.43: Coeficiente de reflexión para el diseño de la antena con filtro de altas frecuencias

En la Figura 3.43 se muestra el coeficiente de reflexión para esta antena una vez obtenidos los valores óptimos de la misma. Se observa cómo se cumplen los parámetros iniciales, y además el filtro rechaza todas las bandas de trabajo superiores a 6 GHz.

3.4.3 Conexión del conector SMA

El siguiente paso es añadirle un conector SMA de $50\ \Omega$ en la pista de alimentación de la antena y volver a realizar un barrido en ciertos parámetros para ajustarlos de nuevo.

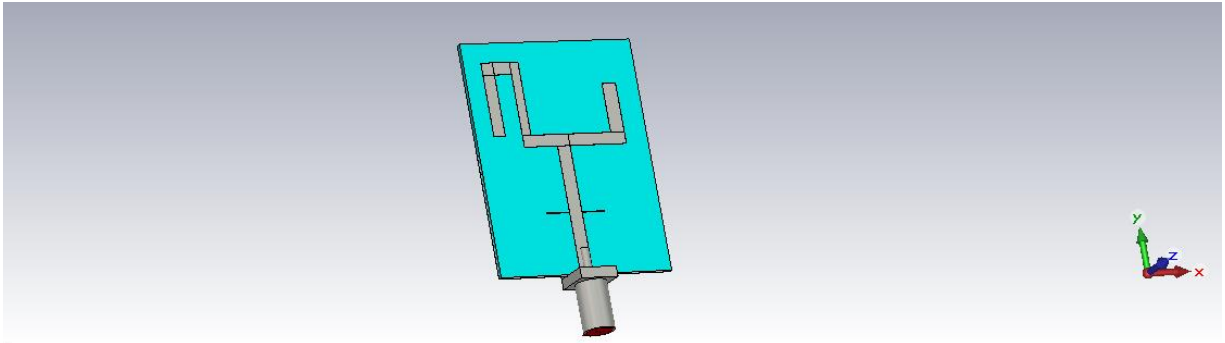


Figura 3.44: Vista en CST de la antena con el filtro de altas frecuencias y el conector SMA.

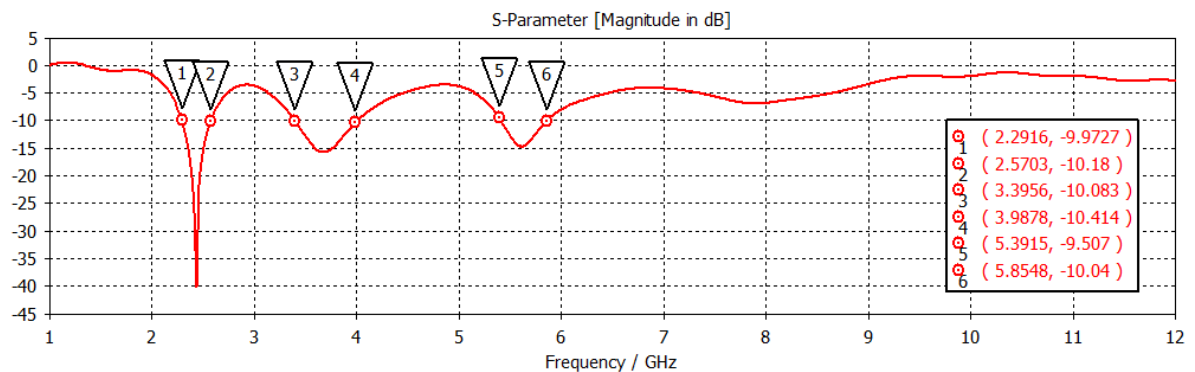


Figura 3.45: Coeficiente de reflexión para la antena con el filtro de altas frecuencias y el conector SMA

El coeficiente de reflexión para la antena, una vez se ha unido el conector, se muestra en la Figura 3.45. Aunque en principio se cumplen las especificaciones, se van a realizar mejoras que permitan mayor ganancia en las bandas de trabajo, así como un mejor comportamiento del filtro para frecuencias superiores a 6 GHz.

Se va a intentar mejorar las bandas de 3.5 y 5.5 GHz para ver si pueden tener una mejor ganancia. Para ello se va a repetir los pasos realizados en las anteriores antenas, realizando un barrido paramétrico sobre los valores que afectan más a estas bandas, como son L_1 , L_2 , L_4 y además vamos a retocar las longitudes de las secciones del filtro para ver como afecta a la antena.

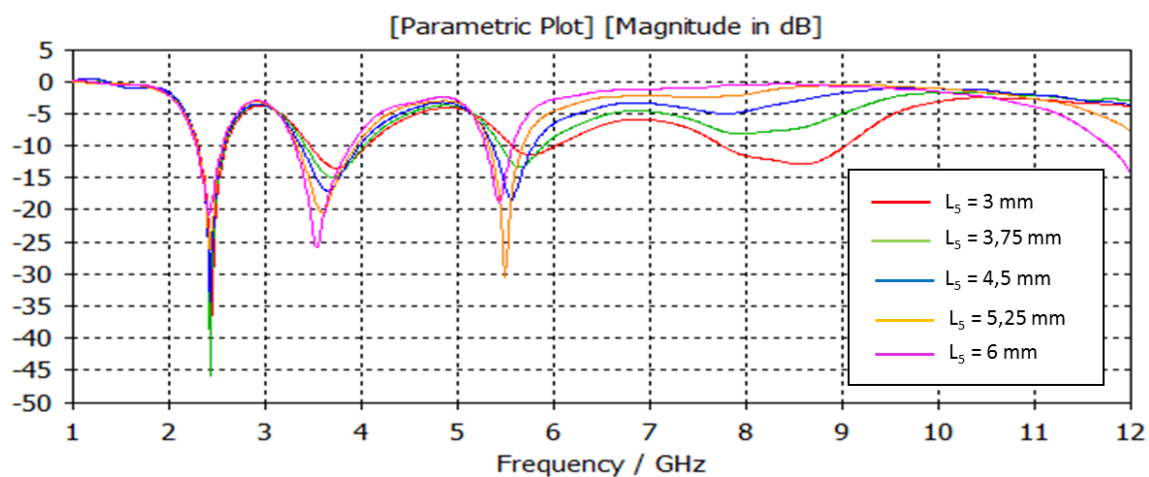


Figura 3.46: Simulación del parámetro L_5

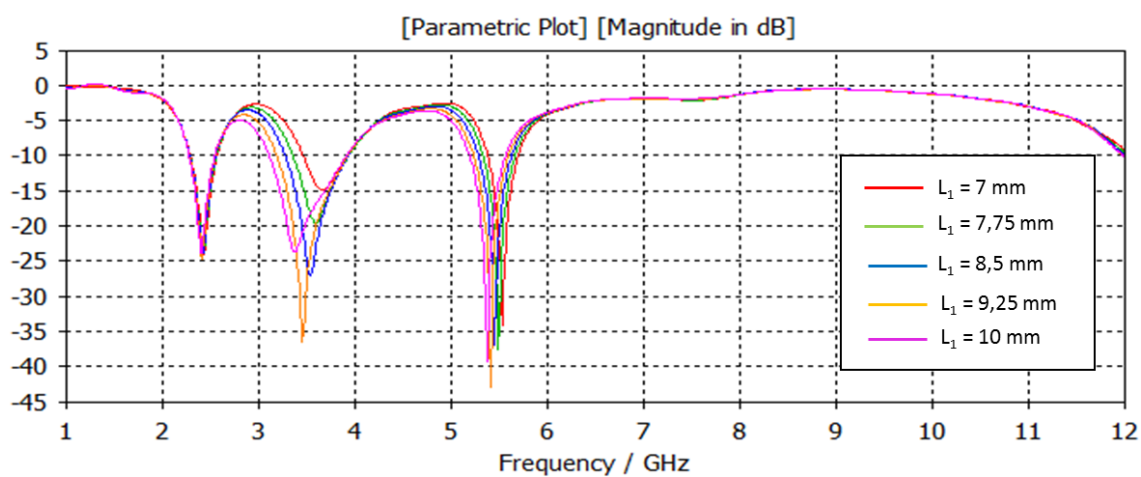


Figura 3.47: Simulación del parámetro L_1

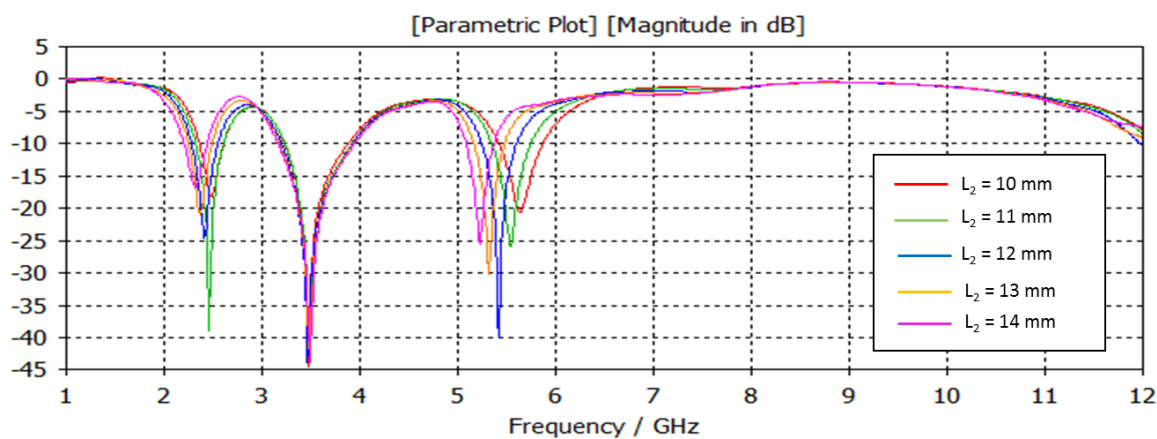


Figura 3.48: Simulación del parámetro L_2

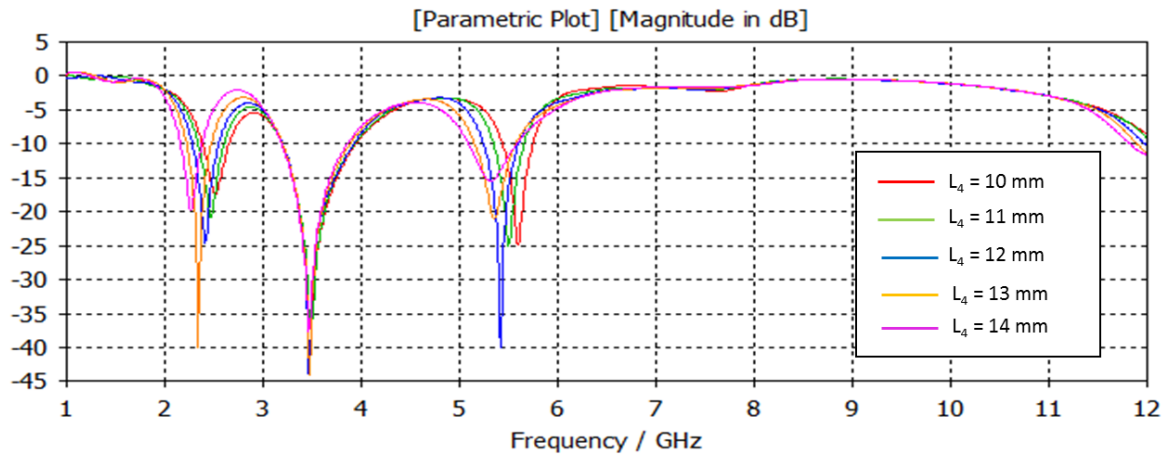


Figura 3.49: Simulación del parámetro L_4

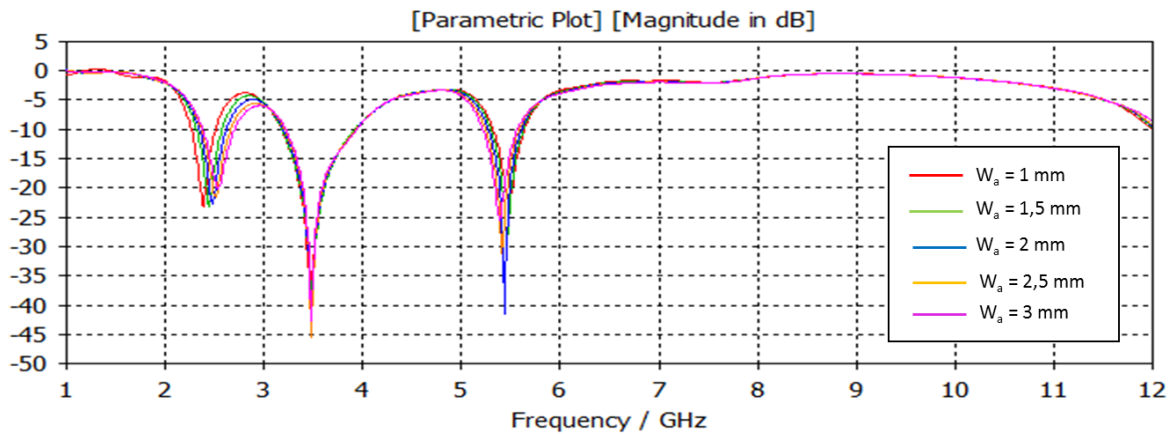


Figura 3.50: Simulación del parámetro W_a

Realizando un barrido paramétrico en L_5 para valores comprendidos entre 3 y 6 mm se busca el valor mas cercano al óptimo para la longitud de las secciones del filtro. Esta simulación se puede comprobar en la Figura 3.46y el valor que mas se aproxima al optimo es 5.5 mm, que se sitúa entre los 5.25 y 6 mm.

En cuanto a L_1 , que como se ha mencionado en otras ocasiones, está directamente relacionada con la banda de frecuencia situada en 3.5 GHz, se realiza un barrido paramétrico entre 7 y 10 mm. En la Figura 3.47 se puede observar los resultados de la simulación y se llega a la conclusión de que un valor entre 8.5 y 9.25 mm sería el mas adecuado. Esto es porque entre esos dos valores, la banda de 3.5 GHz estaría mas centrada y con mejor ganancia. Posteriormente se calcula que el valor más adecuado es 9.1 mm.

Se puede observar en la Figura 3.48, la cual representa una simulación paramétrica de L_2 entre 10 y 14 mm, como a medida que se incrementa su valor desde 10 mm, la banda desciende en frecuencia. Como se puede ver en la figura, el valor mas adecuado para este parametro es 12 mm.

Simulando la última longitud, L_4 , se llega a la misma conclusión que para la gráfica anterior, pero en este caso, afecta a las bandas de 5.5 GHz, y más directamente a la de 2.5 GHz. Por ello, el valor que mejor se adapta en esta simulacion es también 12 mm. Esto se puede comprobar en la Figura 3.49.

Realizando una simulacion parametrica a W_a , como se observa en la Figura 3.50, se producen minimas variaciones que pueden ser aprovechadas para ajustar un poco mejor las bandas en frecuencia. Un valor de 2.5 mm parece mas que correcto.

Una vez calculados los valores óptimos para los distintos parámetros de la antena, se muestra en la tabla 3.7 estos valores. Además se adjunta una captura del coeficiente de reflexión de esta antena en la Figura 3.51 donde podemos comprobar que se cumplen todos los requisitos planteados inicialmente.

L_1	W_t	W_{t1}	L_i	W_{t2}	Gap
9.1 mm	2 mm	1.9 mm	17 mm	2.4 mm	0.9 mm

L_2	W_{t3}	W_{t4}	Espesor	L_4	L_3
12 mm	2 mm	2 mm	0.03 mm	12 mm	5 mm

L	W	H	L_5	L_6	W_{t5}
30 mm	20 mm	20 mm	5.5 mm	5.5 mm	0.1 mm

W_{t6}	W_a				
0.1 mm	2.5 mm				

Tabla 3.7: Medidas antena con filtro de altas frecuencias y conector SMA. Son las medidas finales de este diseño.

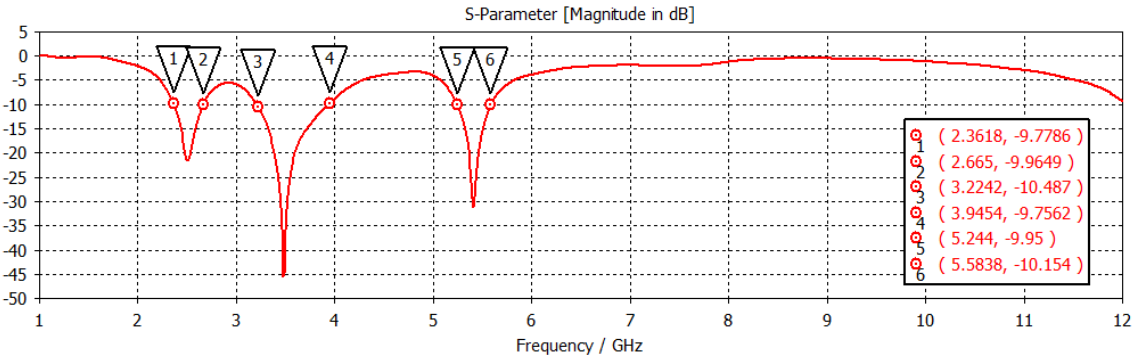


Figura 3.51: Coeficiente de reflexión del diseño final con conector SMA de la antena.

La Figura 3.51 muestra el coeficiente de reflexión para el diseño final, una vez que se ha conectado el conector SMA de $50\ \Omega$. Se pueden diferenciar tres bandas de trabajo que comprenden las siguientes frecuencias: 2.4 a 2.7 GHz, 3.2 a 3.9 GHz y 5.2 a 5.6 GHz. Además, se observa como a partir de 6 GHz no hay ninguna banda de frecuencias.

En el Anexo C se encuentran los diagramas de radiación para este diseño. Al igual que en el caso anterior, los resultados de éstos se corresponden con un dipolo, como cabría esperar.

4 Construcción y medida

En este capítulo se presentan las medidas obtenidas de las antenas construidas, así como la comparación con los resultados obtenidos en la simulación. Los dos elementos construidos en el capítulo 3 han sido construidos y posteriormente medidos con el analizado de redes.

La construcción de las antenas ha sido realizada en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela Politécnica Superior de la UAM. La medición de los coeficientes de reflexión se ha llevado a cabo mediante la utilización del analizador de redes Agilent modelo E5071C.

A continuación, se presentan las medidas de las distintas antenas.

4.1.1 Antena WiFi y WiMAX sin filtro

Una vez realizado el diseño, se procede con su fabricación mediante una impresora de circuitos. Se suelda el conector de $50\ \Omega$ a la línea de alimentación y se procede a su medición con el analizador de redes para comprobar que la antena cumple con los criterios.

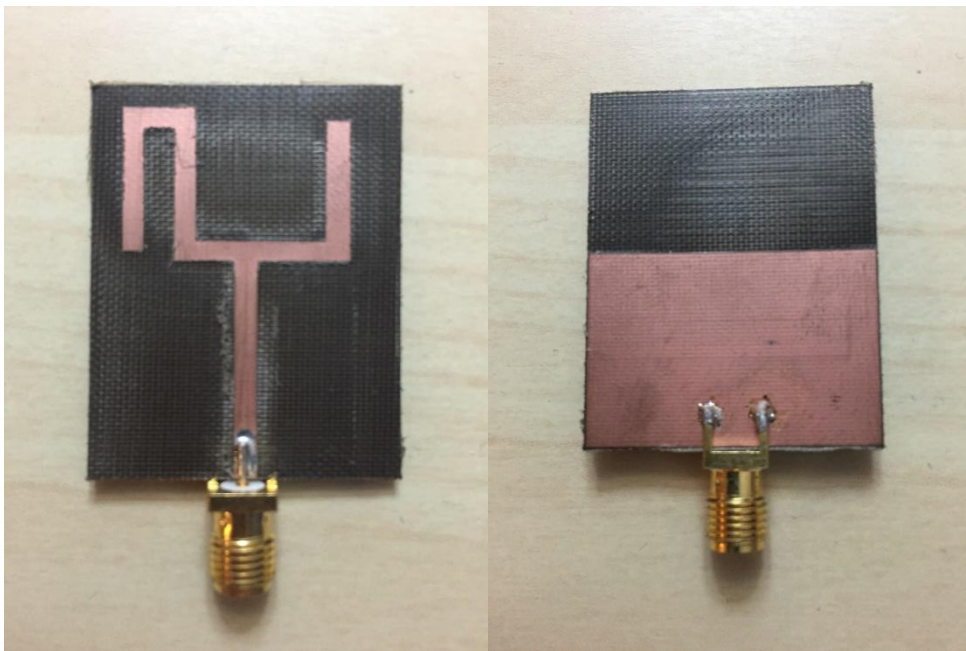


Figura 4.1: Parte frontal y trasera de la antena construida



Figura 4.2: Coeficiente de reflexión obtenido con el analizador de redes para el primer diseño. Se muestra de 1 a 8.5 GHz.

Como se puede observar en la Figura 4.2, la antena cumple con los criterios de diseño especificados al principio de la sección. Se pueden observar ciertas resonancias tanto en la banda de 3.5 GHz, como en la banda de 5.5 GHz.

Comparándolo con la Figura 3.24 que muestra el coeficiente de reflexión en simulación para esta antena, se puede observar como aparecen esas resonancias en las bandas mencionadas anteriormente, así como la aparición de una banda en 7 GHz que en simulación no aparece, esto puede ser debido a que nos centramos en el diseño de la tecnología WiFi y WiMAX las cuales como se mencionó anteriormente hacen uso de las bandas 2.5 y 5.5 GHz, y 3.5 GHz respectivamente.

4.1.2 Antena WiFi y WiMAX con filtro

Una vez construida la antena, se suelda un conector SMA de 50Ω a la línea de alimentación de la antena y se procede a su medición para comprobar que cumple con los criterios especificados. A continuación, se muestra una imagen de la parte superior e inferior de la antena construida.

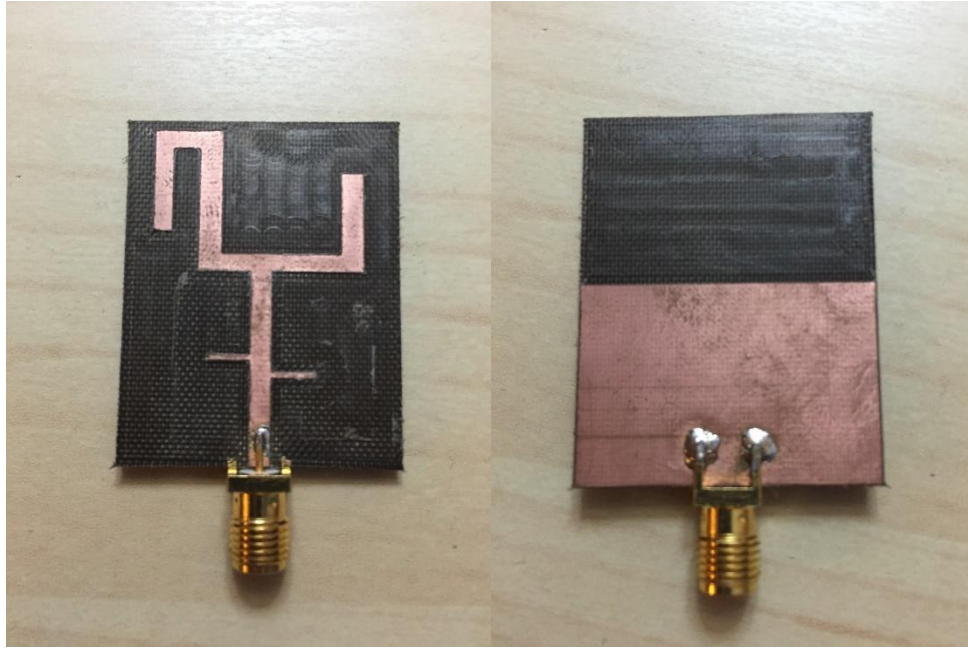


Figura 4.3: Parte frontal y trasera de la antena construida

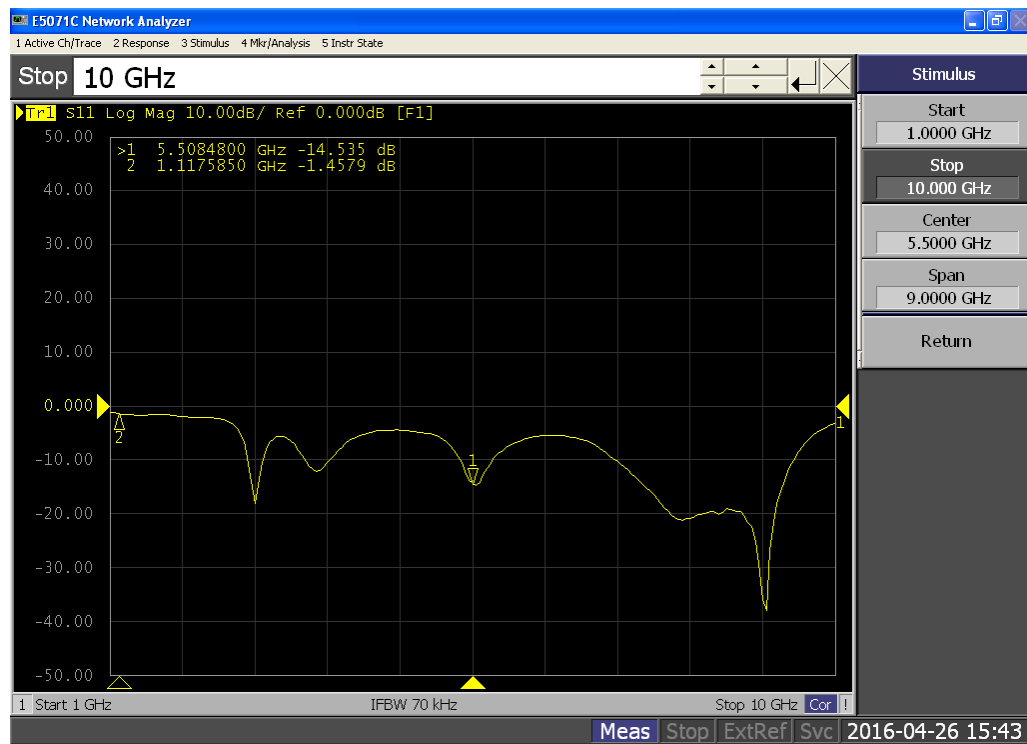


Figura 4.4: Coeficiente de reflexión para el segundo diseño de la antena. El rango de medición abarca de 1 a 10 GHz

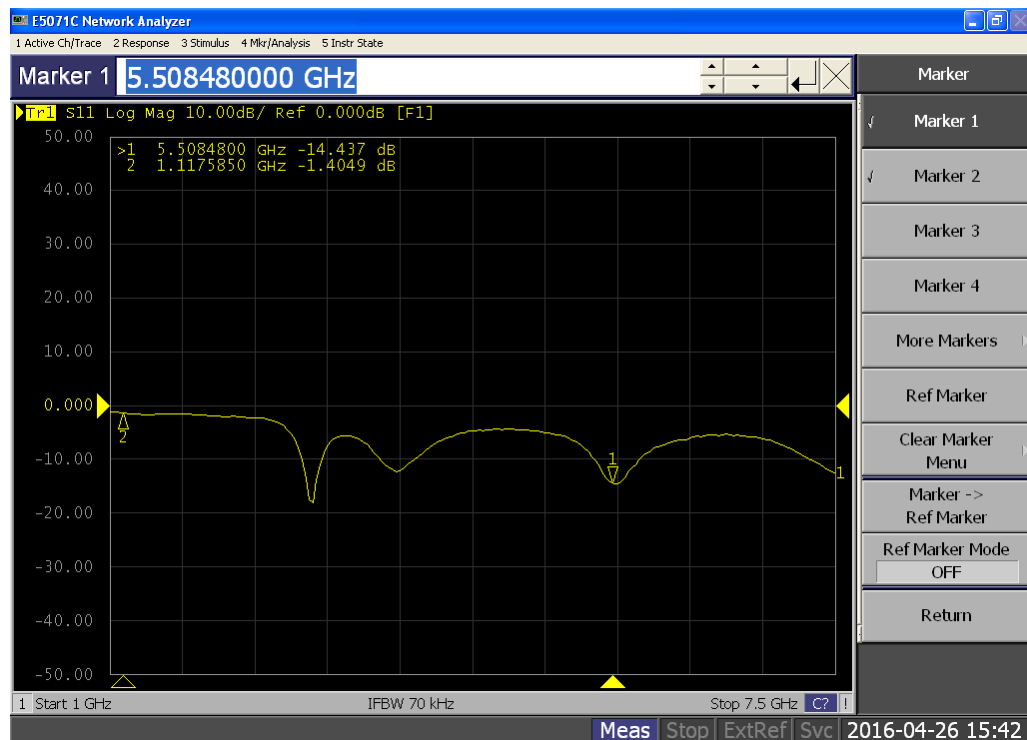


Figura 4.5: Coeficiente de reflexión para el segundo diseño. En este caso el rango de medición abarca desde 1 a 7.5 GHz.

En la primera figura podemos observar cómo, aunque las bandas se cumplen, la ganancia en ellas no es la esperada, además el filtro construido apenas funciona. Esto es debido a que el ancho de pista es muy estrecho (0.1 mm) y la fresadora de la máquina que construye los circuitos no tiene tanta precisión. Mirando con una lupa el filtro se puede ver como este tiene forma de sierra y por ello no muestra el resultado esperado.

Si observamos la segunda gráfica, que muestra las pérdidas de reflexión, pero esta vez acotada hasta 7.5 GHz, podemos observar como el filtro actúa un poco, eliminando las bandas de más de 6GHz.

Una explicación para este fenómeno es que la constante dieléctrica en la simulación es fija ($\epsilon_r = 2.5$), pero esta varía con la frecuencia, es decir, a medida que aumentamos la frecuencia, esta constante puede disminuir.

Por ello, si unimos el hecho de los problemas de fabricación, junto con el hecho de que la constante dieléctrica varíe con la frecuencia, podríamos estar ante las causas de que el filtro no funcione de manera a la esperada.

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En este trabajo de fin de grado se han diseñado, construido y medido varias antenas impresas cuyo objetivo es el de trabajar en las frecuencias del WiFi y WiMAX. Se ha partido de monopolos sencillos, cuya unión ha dado lugar a una antena que cumple los criterios impuestos. Además, se ha realizado una mejora añadiendo un filtro de altas frecuencias en la línea de alimentación de la antena.

El diseño de los elementos unitarios, así como la antena se han mostrado en el capítulo 3. Posteriormente se ha añadido un filtro de altas frecuencias para eliminar todas aquellas bandas que estuvieran por encima de 6 GHz.

En este proyecto se ha utilizado el sustrato TLX-9 con un espesor de $H = 0.787$ mm ya que presentaba menores pérdidas y un mayor rechazo que el sustrato FR-4 utilizado en otros proyectos realizados anteriormente.

Las simulaciones se han realizado inicialmente con puertos, y posteriormente con una réplica del conector SMA a utilizar, para que estas simulaciones se acerquen lo más posible a la realidad. Se ha podido observar, en el caso de las simulaciones con filtros, como éste se ha desplazado en frecuencia, puesto que nuestras simulaciones se han realizado con un constante dieléctrica fija (ϵ_r).

Con el fin de mejorar los anchos de banda, así como centrarlos en las frecuencias deseadas, se realizan modificaciones en los elementos radiantes y en las líneas de transmisión.

Para el primer diseño, se retocaron todas las longitudes y anchuras de pista con el objetivo de que este elemento radiante cumpliera con las especificaciones. Una vez alcanzadas en simulación, se construyó con la impresora de circuitos y se realizó la medición con el analizador de redes. En el capítulo 4 se pudo comprobar cómo se cumplían los objetivos, observando que el diagrama de pérdidas era muy similar tanto en la simulación como en la medición real.

En el segundo diseño, que se propuso como mejora del primero, se ha diseñado un filtro basado en un circuito abierto colocado sobre el plano de masa y unido a la línea de alimentación de la antena. En simulación se pudo comprobar que tanto con los puertos, como con el conector SMA, la antena cumplía los criterios, el problema surgió cuando se construyó, puesto que las líneas de transmisión que conformaban el filtro eran muy delgadas (0.1 mm) y la fresadora de la máquina de imprimir circuitos no es tan precisa, provocando daños en las líneas. Cuando se realizó la medición, se pudo comprobar cómo estas habían sido dañadas, y el filtro funcionaba únicamente hasta los 7.5 GHz.

5.2 Trabajo futuro

Una de las principales líneas de mejora de este trabajo es intentar ensanchar las líneas de transmisión del filtro de altas frecuencias del segundo diseño manteniendo los criterios de diseño iniciales, para que la fresadora de la impresora de circuitos no le produzca daños. Sino también puede intentarse construir la antena con la anchura propuesta de 0.1 mm en los filtros, pero esta vez, utilizando otro tipo de impresora de circuitos más precisa que no dañe esas pistas.

Otra mejora que se propone para el futuro es el diseño y simulación de la antena en distintos dieléctricos y espesores, para poder analizar el efecto del dieléctrico en la antena. Además, también se podría intentar que la antena tuviera un tamaño más reducido, con el fin de que ésta pueda ser incorporada en dispositivos más pequeños.

Diseñar filtros con otras formas, que puedan ser aún más eficientes, puede ser otra línea de trabajo futuro para este TFG.

También podría diseñarse una antena de parche apilado con los dos diseños realizados y ver si la antena presenta mejoras.

Referencias

- [1] 145-1983 - IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas
<https://standards.ieee.org/findstds/standard/145-1983.html>
- [2] Proyecto de Fin de Carrera de Eva Morodo Lasa: Diseño e implementación de nuevas antenas ultra wide band con filtros de rechazo de bandas integrados.
- [3] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [4] Figura 2.1: Diagrama de radiación en 3D.
<http://www.zero13wireless.net/Thread-Proyecto-Cantenna-BELGRANO-por-Mandarache?page=231>
- [5] Figura 2.2: Diagrama de radiación en 2D.
https://sillateleinfo.wordpress.com/pagina_003/sistema-telecomunicacion/antena-helicoidal/
- [6] Tipos de redes y estándares WiFi.
<https://norfipc.com/redes/tipos-redes-estandares-wi-fi-diferencias.php>
- [7] WiMAX IEEE 802.16 technology.
<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wimax/wimax.php>

Glosario

B

BW Band Width

I

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

H

HF High Frequency

M

MIMO Multiple In Multiple Out

P

PCB Printed Circuit Board

R

ROE Relación de Onda Estacionaria

S

SWR Standing Wave Ratio

T

TFG Trabajo de Fin de Grado

U

UHF Ultra High Frequency

V

VHF Very High Frequency

W

WECA Wireless Ethernet Compatibility Alliance

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

Anexos

A Antena Fractal WiFi

En este anexo, se propone el diseño de una antena WiFi que trabaje en las bandas de 2.4 GHz (2.44 GHz) y 5 GHz (5.2-5.8 GHz). Se propone un diseño de antena fractal. Las antenas fractales son aquellas que tienen una forma que luego es subdividida en secciones iguales, pero de tamaño reducido proporcionalmente. Las formas similares de las partes fractales son las responsables de las distintas bandas de trabajo y contribuyen a que las antenas tengan un tamaño más reducido. Las discontinuidades incrementan el ancho de banda, así como contribuyen al debilitamiento de la radiación de las antenas.

La antena tendrá una estructura formada por una línea de alimentación que terminará en un elemento radiante fractal. A continuación, se muestra un esquema de dicha antena.

El dieléctrico elegido para este diseño es un FR-4 de 1.5 mm de grosor y con una constante dieléctrica de $\epsilon_r = 4.4$.

Como se puede observar, la antena está formada por dos partes trapezoidales de material conductor, y entre medias otras dos partes trapezoidales compuestas de material dieléctrico.

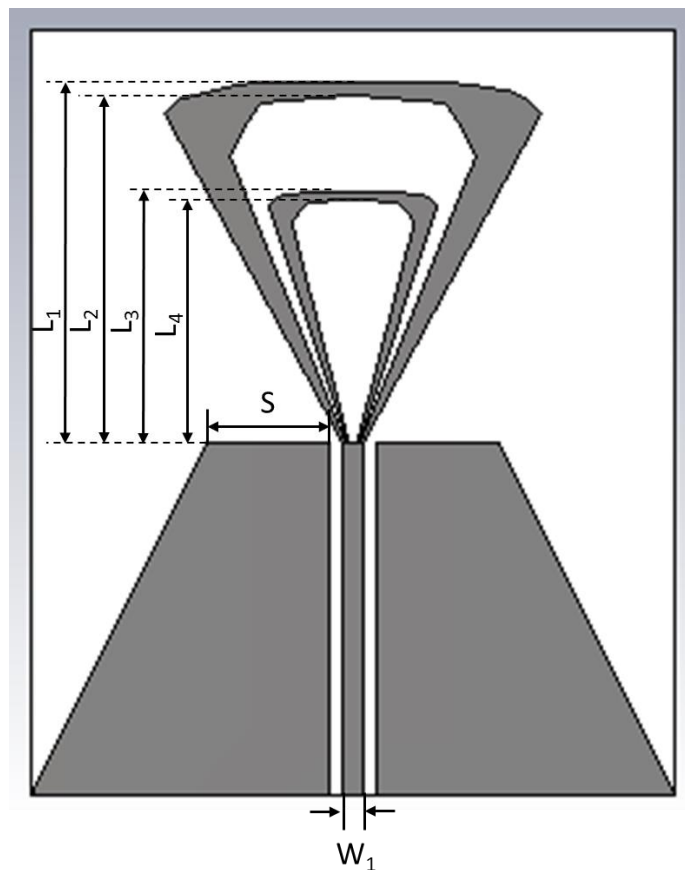


Figura A.1: Esquema de la antena propuesta.

Una vez se ha construido un primer diseño de la antena, con unas medidas iniciales, se procede a realizar un barrido paramétrico sobre los mismos para obtener los parámetros más adecuados y que hagan que la antena cumpla con las bandas de trabajo establecidas al principio de esta sección.

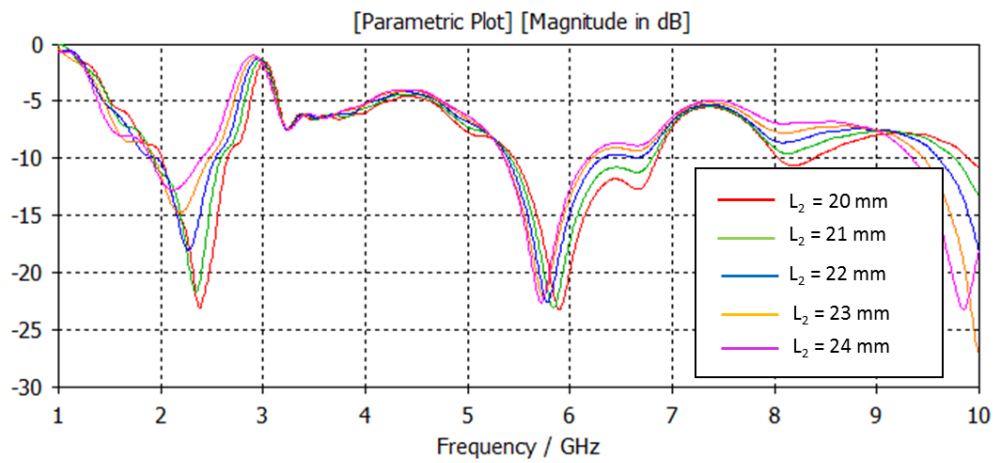


Figura A.2: Simulación del parámetro L_2

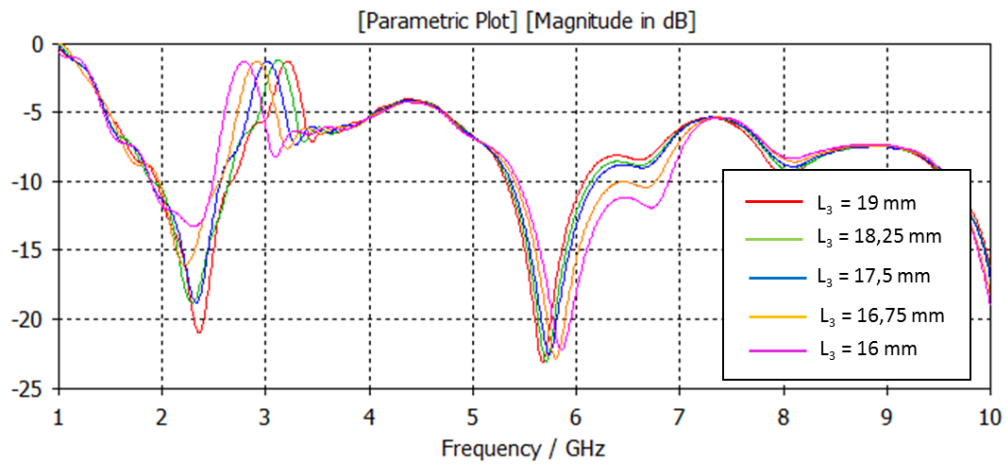


Figura A.3: Simulación del parámetro L_3

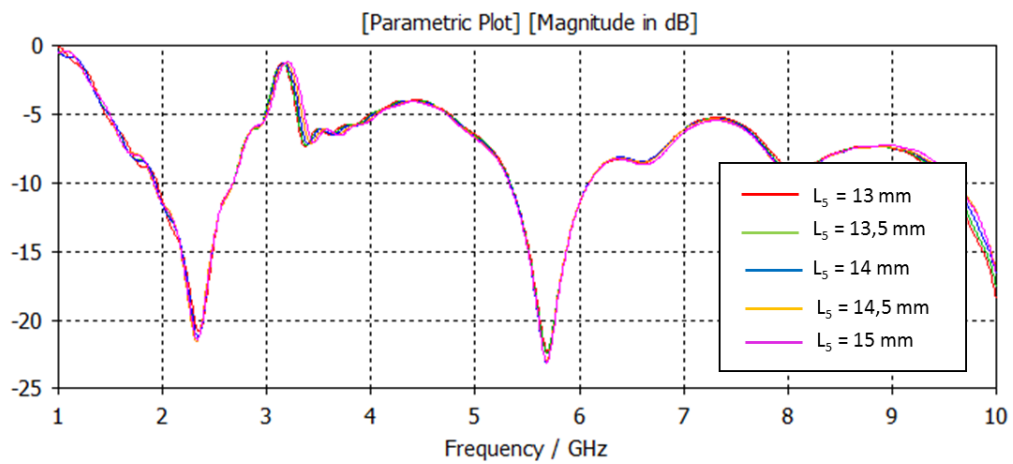


Figura A.4: Simulación del parámetro L_5

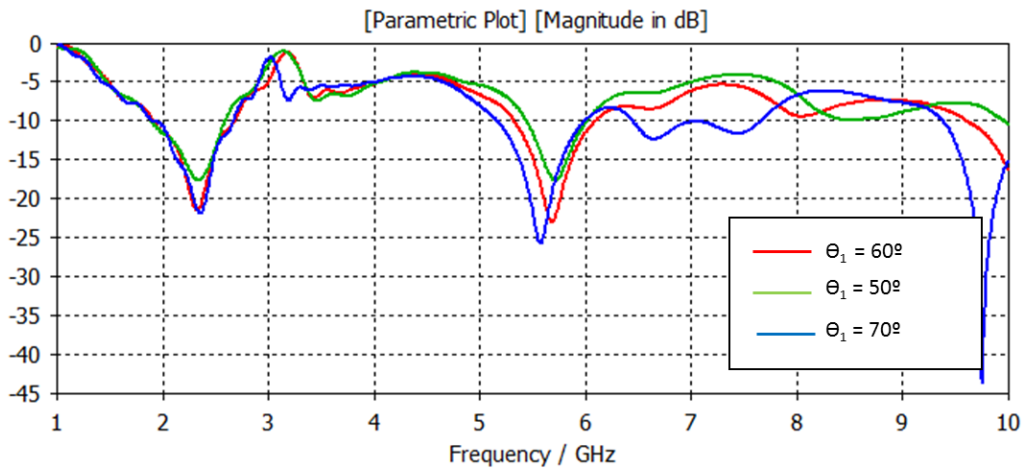


Figura A.5: Simulación del parámetro Θ_1

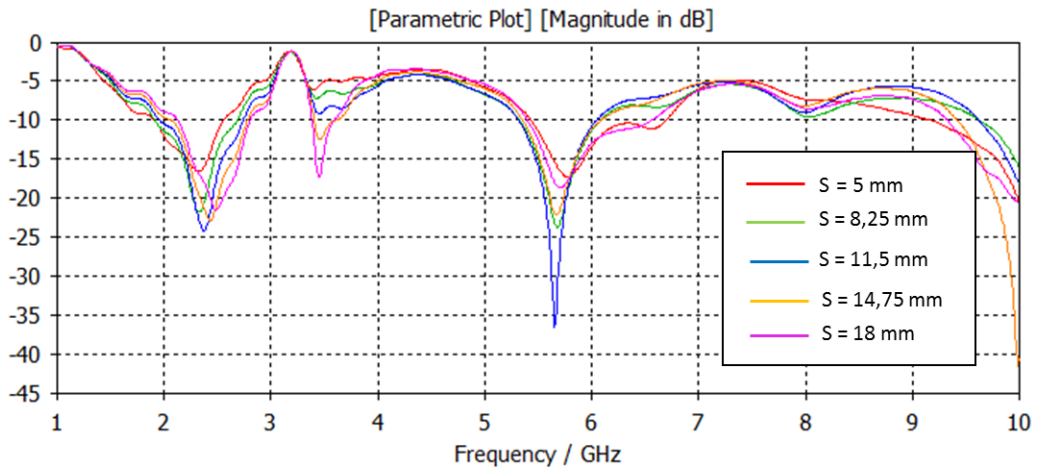


Figura A.6: Simulación del parámetro S

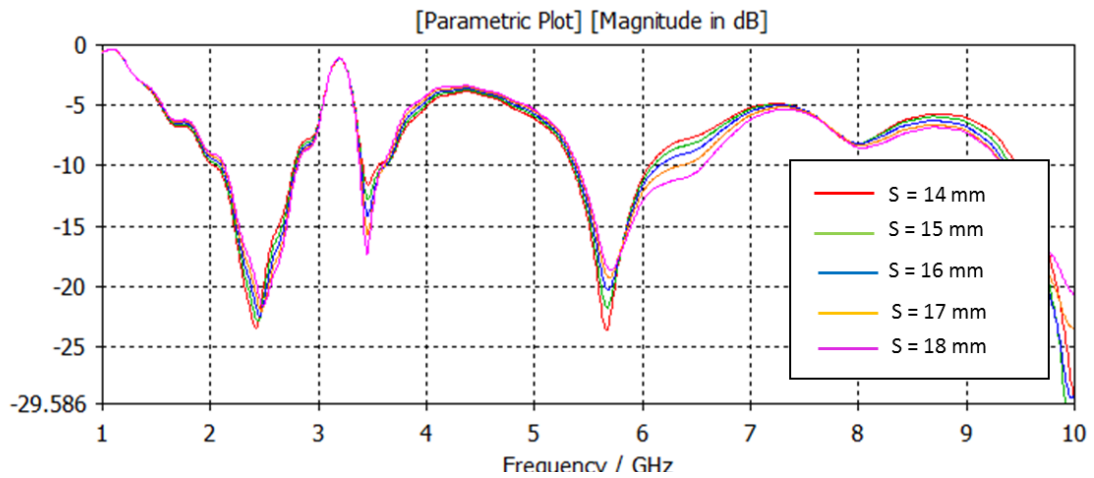


Figura A.7: Simulación del parámetro S acotada

La Figura A.2 muestra como a medida que modificamos la altura del primer trapezoide, L_2 las bandas se desplazan a frecuencias inferiores. Observando la gráfica se llega a la conclusión de que una longitud L_2 de 22 mm es adecuada para el diseño.

Variando el tamaño del trapezoide de mayor tamaño relleno de material dieléctrico, se observa como el ancho de banda cambia para ambas bandas de trabajo. Esto se muestra en la Figura A.3, donde se varia el valor del parámetro L_3 y se ve como a medida que ese espacio de dieléctrico aumenta, lo hace también la banda.

Realizando un barrido paramétrico sobre el trapezoide más pequeño, se observa como apenas varía el coeficiente de reflexión. En la Figura A.4, se puede apreciar esta mínima variación al simular L_5 entre 13 y 15 mm.

Simulando el ángulo del vértice principal, Θ_1 , se puede comprobar como la variación de este afecta sobre todo a la banda de trabajo de 5.2 – 5.8 GHz. Un ángulo de unos 60° parece suficiente para que se cumplan los criterios como se puede observar en la Figura A.5.

Variando el ancho del plano de masa, se puede comprobar como el ancho de banda de las bandas de frecuencia también aumenta, y además aparecen espurias en la banda de 3.4-3.6 GHz, que podrían servir para el WiMAX. La Figura A.6 muestra un barrido para S entre 5 y 18 mm, y la Figura A.7 un barrido paramétrico más concentrado, entre 14 y 18 mm.

Una vez elegidos todos los parámetros, a continuación, se muestra el coeficiente de reflexión final de la antena, Figura A.8.

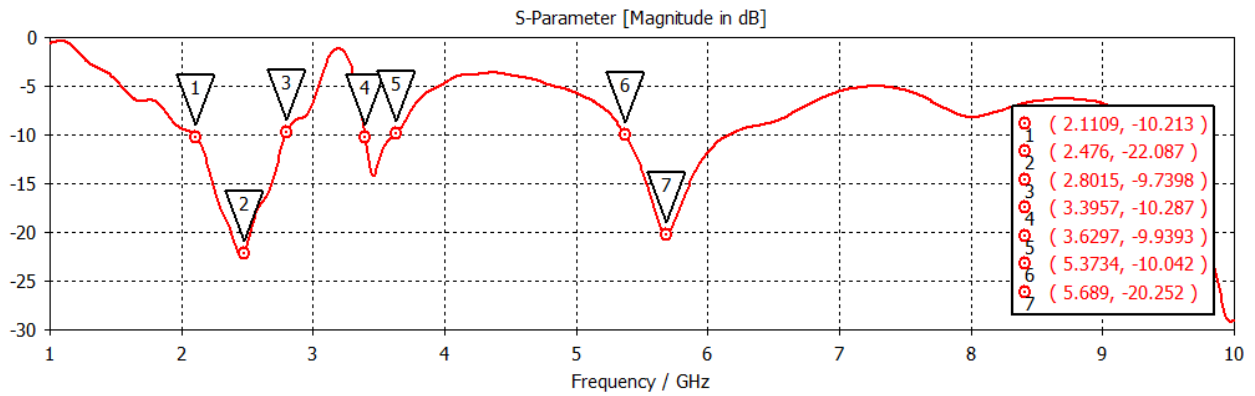


Figura A.8: Coeficiente de reflexión de la antena

En la Tabla A.1 se muestran los valores usados en este diseño para que éste cumpla los criterios de diseño establecidos al principio de este anexo.

L	W	L_1	L_2	L_3	L_4
50 mm	42 mm	23 mm	22 mm	18.75 mm	15.5 mm

L_5	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	d_w
14.5 mm	60 mm	50 mm	40 mm	30 mm	0.9 mm

S
16 mm

Tabla A.1: Valores óptimos de los parámetros de diseño

B Diagramas de radiación Antena WiFi y WiMAX

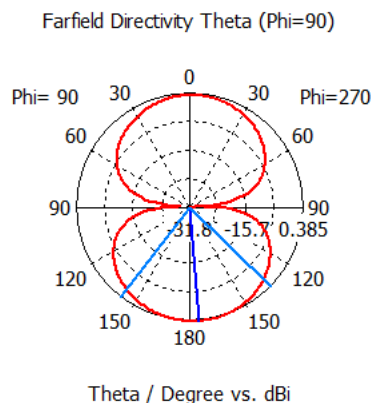


Figura B.1: Campo eléctrico para $f=2.452$ GHz

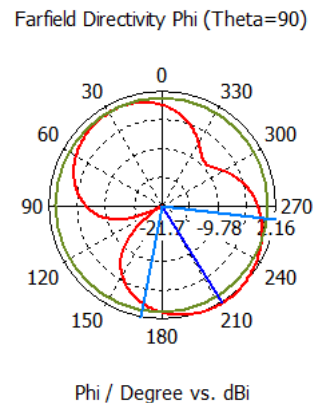


Figura B.2: Campo magnético para $f=2.452$ GHz

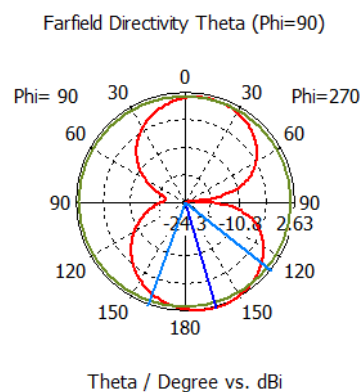


Figura B.3: Campo eléctrico para $f=3.541$ GHz

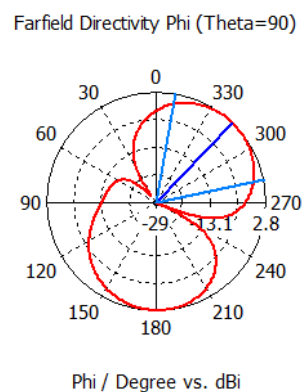


Figura B.4: Campo magnético para $f=3.541$ GHz

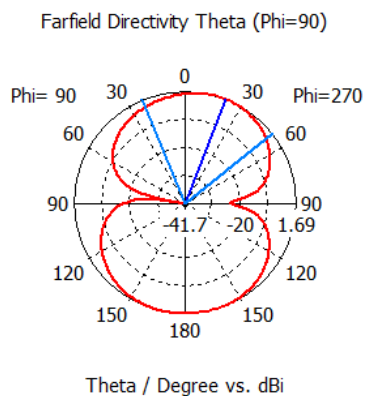


Figura B.5: Campo eléctrico para $f=5.675$ GHz

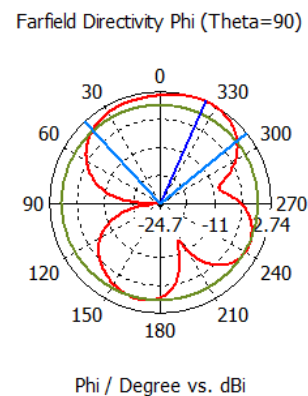


Figura B.6: Campo magnético para $f=5.675$ GHz

C Diagramas de radiación Antena WiFi y WiMAX con filtro

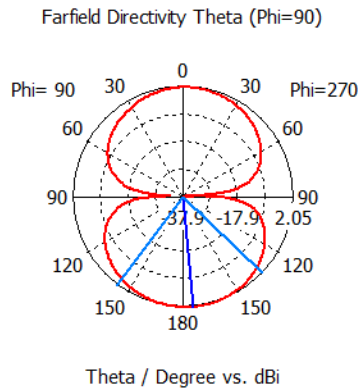


Figura C.1: Campo eléctrico para $f=2.507$ GHz

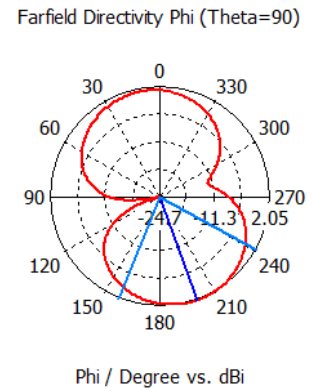


Figura C.2: Campo magnético para $f=2.507$ GHz

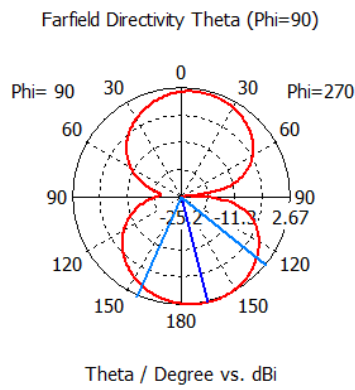


Figura C.3: Campo eléctrico para $f=3.475$ GHz

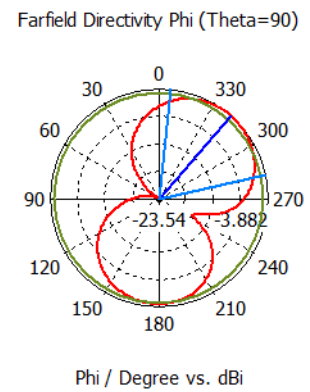


Figura C.4: Campo magnético para $f=3.475$ GHz

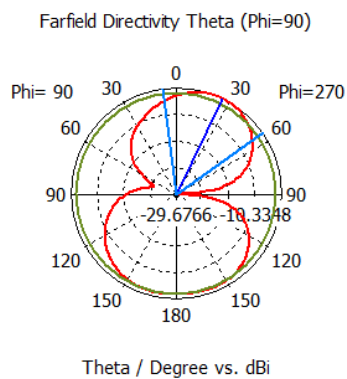


Figura C.5: Campo eléctrico para $f=5.411$ GHz

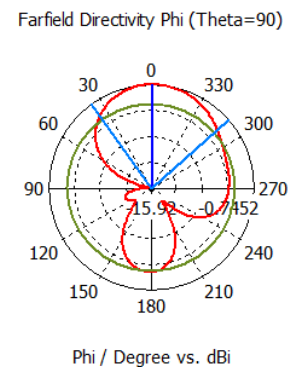


Figura C.6: Campo magnético para $f=5.411$ GHz

